

HTR-BETONVERSUCHE

- Hochtemperaturfestigkeitsversuche -

Abschlußbericht

erstattet von

Dr.-Ing. U. Diederichs

Januar 1989

BIBLIOTHEK
Institut für Baustoffe, Massivbau und Brandschutz
der Technischen Universität Braunschweig
Beethovenstraße 52
D-3300 Braunschweig

Untersuchung im Auftrage der
Hochtemperatur-Reaktorbau GmbH, Mannheim
Bestellung: 675.513.1001.08000.30/200 vom 01.07.1988

Inhaltsverzeichnis

	Seite
1. Allgemeines	3
2. Aufgabenstellung	3
3. Experimentelles	4
3.1 Probekörper	4
3.2 Versuchsdurchführung	5
4. Versuchsergebnisse	9
4.1 Gesamtverformungen von belasteten Proben während der Aufheizung	9
4.2 Thermische Ausdehnung der Proben	15
4.3 Instationäre Kriechverformungen	17
4.4 Ergebnisse σ - ϵ -Versuche bei hohen Temperaturen	21
5. Zusammenfassung	26
6. Schriftum	29
7. Anhang	

1. Allgemeines

Mit der Bestellung Nr.: 675.513.1001.08000.30/200 vom 01.07.1988 beauftragte die Firma Hochtemperatur-Reaktorbau GmbH, Mannheim, das Institut für Baustoffe, Massivbau und Brandschutz der Technischen Universität Braunschweig mit der Durchführung von Hochtemperaturfestigkeitsversuchen an Basaltbeton mit vorgegebener Zusammensetzung (HRB-Spezifikation: PNP-5131-CB-GHRA 000 752 vom 29.12.1983). Der Umfang der Versuche und die Versuchsdurchführung wurden im einzelnen im Angebot des Instituts für Baustoffe, Massivbau und Brandschutz -Di/Schr- vom 23.10.1987 festgelegt.

Über den bestellten Versuchsumfang hinausgehend wurden aus wissenschaftlichem Interesse zusätzlich Versuche mit Rheinkiesbeton durchgeführt. Die angefallenen Kosten für die Durchführung und Auswertung dieser Versuche sowie die Kosten für die Berichterstattung wurden aus Mitteln des Instituts für Baustoffe, Massivbau und Brandschutz finanziert.

Im vorliegenden Abschlußbericht sind alle Versuchsergebnisse zusammenfassend dargestellt. Vorangestellt sind dem Bericht nochmals die Aufgabenstellung und Angaben über die Durchführung der Versuche.

2. Aufgabenstellung

Im Rahmen der bisher durchgeführten Untersuchungen /1 bis 5/ wurde die Temperaturabhängigkeit der Betondruckfestigkeit nur bis 300 °C untersucht. Bei den hypothetischen Störfällen sind jedoch höhere thermische Belastungen zu erwarten. Deshalb war es erforderlich, in ergänzenden Versuchen auch den Einfluß höherer Temperaturen (400 - 600 °C) auf den Verlauf der Betondruckfestigkeit zu ermitteln.

Die Versuche sollten auf dem Hochtemperaturprüfstand an zylindrischen, unversiegelten Basaltbetonproben (\emptyset 8 cm, l = 24 cm) durchgeführt werden. Dazu sollten die Proben mit 15 N/mm^2 in den Prüfstand eingebaut, unter Beibehaltung der Belastung auf folgende Versuchstemperaturen aufgeheizt werden: 400 °C, 500 °C und 600 °C. Nach Erreichen der Versuchstemperatur war eine einstündige Homogenisierung der Proben bei der entsprechenden Temperatur geplant. Dann war der E-Modul durch dreimaliges Ent- und Belasten ($\sigma_u = 0,5 \text{ N/mm}^2$; $\sigma_0 = 15 \text{ N/mm}^2$) zu bestimmen. Die jeweiligen Versuche sollten mit der Bestimmung der Heißdruckfestigkeit beendet werden.

Die Aufheizung der Proben sollte auf 3 unterschiedliche Arten erfolgen:

- I: "langsame" Aufheizung mit konstanter Aufheizgeschwindigkeit von rd. 5 K/h;
- II: "schnelle" Aufheizung mit konstanter Aufheizgeschwindigkeit von rd. 20 K/h;
- III: "stufenförmige" Aufheizung, wobei die Proben mit 5 K/h auf 120 °C aufgeheizt, ca. 24 h bei dieser Temperatur gehalten und anschließend mit 20 K/h auf die o. g. Versuchstemperaturen erwärmt werden.

Die Betonverformungen sollten während der gesamten Versuchsdurchführung ständig registriert werden. Insgesamt waren lt. HRB-Bestellung 9 Probekörper aus Basaltbeton herzustellen und bei hohen Temperaturen zu untersuchen.

3. Experimentelles

3.1 Probekörper

Für die Versuchsdurchführung wurden je Betonart mindestens neun Proben benötigt. Da für die im Rahmen des Hauptprogrammes durchgeführten Versuche /1 bis 5/ ausreichend Reserveproben betoniert worden waren, konnte der größte Teil der Proben für die Hochtemperaturfestigkeitsversuche aus den entsprechenden Betonierserien entnommen werden. Zur leichteren Orientierung sind die Betoniertermine und die Bezeichnungen der Probekörper in der nachfolgenden Tabelle 1 zusammengestellt.

Da über die Probekörperherstellung bzw. Probenvorbereitung und -lagerung bis zum Versuchsbeginn ausführlich in /1 bis 5/ berichtet worden ist, kann an dieser Stelle darauf verzichtet werden.

Aus Übersichtsgründen sind in den folgenden Tabelle 2 und 3 die Referenzwerte der Kurzzeitdruckfestigkeiten, E-Moduln und Rohdichten für die verwendeten Betonserien zusammengestellt. Eine ausführliche Diskussion der Daten ist in /1 bis 5/ gegeben.

Tabelle 1: Betoniertermine und Bezeichnung von Probekörpern, die für die Hochtemperaturfestigkeitsversuche verwendet wurden

Herstellungsdatum/ Beton-Nr.	Probenbezeichnung	Probenanzahl und -art
06.02.1984 Nr. 20/84 (Basaltbeton)	A 1 - A 12 A 69 - A 102 AW 25 - AW 36	11 Zylinder Ø 8 cm, l = 30 cm 34 Zylinder Ø 15 cm, l = 30 cm 12 Würfel 15/15/15 cm ³
05.02.1985 Nr. 19/85 (Basaltbeton)	A 201 - A 212 A 221 - A 240 AW 201 - AW 212 AW 213 - AW 224	12 Zylinder Ø 15 cm, l = 30 cm 20 Zylinder Ø 8 cm, l = 30 cm 12 Würfel 15/15/15 cm ³ 12 Würfel 20/20/20 cm ³
01.10.1984 Nr. 152/84 (Rheinkiesbeton)	R 101 - R 136 R 141 - R 143 RW 101 - RW 112 RW 113 - RW 124	36 Zylinder Ø 8 cm, l = 30 cm 3 Zylinder Ø 15 cm, l = 30 cm 12 Würfel 15/15/15 cm ³ 12 Würfel 20/20/20 cm ³

3.2 Versuchsdurchführung

Für die Durchführung der Versuche standen am Institut für Baustoffe, Massivbau und Brandschutz zwei servohydraulische Hochtemperatur-Prüfmaschinen - eine mit einer Nennkraft von 400 kN und eine mit einer Nennkraft von 1000 kN - zur Verfügung. An den Prüfanlagen mußten vor dem eigentlichen Beginn der Versuche kleinere Umbauten und Ergänzungen durchgeführt werden.

Die Kraftmessung erfolgt bei den servohydraulischen Prüfmaschinen mit Hilfe von Ringtorsionskraftmeßdosen (Nennkraft 400 kN bzw. 1000 kN, Gesamtfehler jeweils bezogen auf Nennkraft < ± 0,02 %; genauer als Güteklasse I nach DIN 51 220).

Tabelle 2: Kurzzeitdruckfestigkeiten, E-Moduln und Rohdichten der Basaltbetonproben bei Raumtemperatur (Referenzversuche, Lagerung der Proben bis zum Versuchsbeginn unter Wasser bei 20 °C)

Probekörper	Art der Proben	Festigkeit [N/mm ²]	E-Modul [kN/mm ²]	Rohdichte [kg/dm ³]	Bemerkungen
AW 31 AW 32 AW 33	Würfel 15/15/15	73 71 79 $\bar{x} = 74$	- - - -	2,58 2,56 2,57 2,57	Prüfung in Halle I Prüfmaschine: Schenck-Trebel, 5.000 kN Probenalter: 90 d
AW 36	Würfel 15/15/15	84	-	-	Probenalter: 360 d
A 88 A 94 A 95	Zylinder Ø 15/1 = 30 cm	71 71 71 $\bar{x} = 71$	44,8 42,8 48,6 45,4	2,55 2,56 2,56 2,56	Prüfung in Halle I Prüfmaschine: Schenck-Trebel, 5.000 kN Probenalter: 90 d
A 64 A 77 A 92	Zylinder Ø 15/1 = 30 cm	70 74 67 $\bar{x} = 70$	- - - -	2,38 2,38 2,38 2,38	Prüfung in Halle I Prüfmaschine: Schenck-Trebel, 5.000 kN Probenalter: 95 d
AW 207 AW 208 AW 209	Würfel 15/15/15	82 77 76 $\bar{x} = 78$	- - - -	2,54 2,55 2,54 2,54	Prüfung in Halle I Prüfmaschine: Schenck-Trebel, 5.000 kN Probenalter: 90 d
AW 210 AW 211 AW 212	Würfel 15/15/15	83 79 83 $\bar{x} = 82$	- - - -	2,52 2,51 2,53 2,52	Prüfung in Halle I Prüfmaschine: Schenck-Trebel, 5.000 kN Probenalter: 360 d
A 201 A 202 A 203	Zylinder Ø 15/1 = 30 cm	77 76 75 $\bar{x} = 76$	44,3 46,6 43,9 45,0	2,55 2,54 2,53 2,54	Prüfung in Halle I Prüfmaschine: Schenck-Trebel 5.000 kN Probenalter: 90 d

Tabelle 3: Kurzzeitdruckfestigkeiten, E-Moduln und Rohdichten der Rheinkiesbetonproben bei Raumtemperatur (Referenzversuche, Lagerung der Proben bis zum Versuchsbeginn unter Wasser bei 20 °C)

Probekörper Nr.	Art der Proben	Festigkeit [N/mm ²]	E-Modul [kN/mm ²]	Rohdichte [kg/dm ³]	Bemerkungen
RW 107 RW 108 RW 109	Würfel 15/15/15	71 73 69 $\bar{x} = 71$	- - - -	2,44 2,43 2,45 2,44	Prüfung in Halle I Prüfmaschine: Schenck-Trebel, 5.000 kN Probenalter: 93 d
RW 110 RW 111 RW 112	Würfel 15/15/15	$\bar{x} =$			Probenalter: *)
R 141 R 142 R 143	Zylinder Ø 15/1 = 30 cm	67 66 68 $\bar{x} = 67$	37,6 35,4 34,3 35,8	2,44 2,44 2,44 2,44	Prüfung in Halle I Prüfmaschine: Schenck-Trebel, 5.000 kN Probenalter: 90 d
R 115 R 117 R 129	Zylinder Ø 8/1 = 24 cm	68 70 67 $\bar{x} = 68$	- - - -	2,42 2,42 2,42 2,42	Prüfung in Halle I Prüfmaschine: TONI 600 kN Probenalter: 335 d
R 111 R 131 R 112	Zylinder Ø 8/1 = 24 cm	68 64 64 $\bar{x} = 65$	40,2 38,7 40,5 39,8	- - - -	Prüfung mit servo- hydraulischer Prüf- maschine: Schenck, Probenalter: 334 d

*) noch nicht geprüft

Die Verformungen wurden mit Hilfe von zwei Dilatometern (bestehend aus einer temperaturbeständigen Klemmvorrichtung, zwei Zerodurstäben, einem Parallelenkersystem und einem induktiven Wegaufnehmer mit angeschlossenen Trägerfrequenzmeßverstärker) gemessen. Die Meßstrecke liegt symmetrisch zur Probekörpermitte und hat eine Länge von 180 mm. Die Meßergebnisse sind somit frei von Randeinflüssen.

Die Beheizung der Proben erfolgt jeweils über einen elektronisch geregelten 3-Zonen-Kammerofen. Die Temperaturen wurden jeweils auf der Mantelfläche der Proben im Abstand von ca. 3 cm von den oberen bzw. unteren Probenstirnflächen mit Eisenkonstanten-Thermoelementen (nach DIN 43 710) gemessen und mit Hilfe eines Kompensations-Schreibers aufgezeichnet.

Die Versuchsdurchführung zur Ermittlung der Hochtemperaturfestigkeiten ist schematisch in Bild 1 dargestellt. Zum Zeitpunkt $t = 0$ werden die Proben unter einer geringen Belastung in die Prüfmaschine eingebaut. Anschließend erfolgt zur Bestimmung des E-Moduls bei Raumtemperatur eine dreimalige Be- und Entlastung zwischen 15 N/mm^2 und etwa $0,1 \text{ N/mm}^2$. Dann wird die Probe wieder mit 15 N/mm^2 belastet und unter Aufrechterhaltung der konstanten Last aufgeheizt. Nach dem Erreichen der angestrebten Versuchstemperatur - im dargestellten Fall 600°C - wird die Probe zur Erzielung eines stationären Temperaturfeldes noch 2 Stunden lang bei der Versuchstemperatur gehalten. Dann wird sie zum Zeitpunkt t^* zur Bestimmung des E-Moduls wiederum dreimal ent- und belastet, bevor der Versuch mit der Bestimmung der Hochtemperaturfestigkeit beendet wird.

Die Bestimmung der Hochtemperaturfestigkeit erfolgt im dehnungsgeregelten Versuch, d. h., der Probekörper wird mit konstanter Dehnungsgeschwindigkeit von $0,03 \text{ }^\circ/\text{oo/s}$ bis zum Bruch belastet. Als Bruchspannung ist dabei die maximal vom Probekörper aufgenommene Spannung definiert.

Die Verformungen des Probekörpers werden während der gesamten Temperierung kontinuierlich gemessen.

Die Aufheizung der mechanisch belasteten Proben erfolgte nach drei unterschiedlichen Temperierungsprogrammen (vgl. Bild 2):

- Beim Temperierungsprogramm I werden Proben "langsam" mit konstanter Aufheizgeschwindigkeit von rund 7 K/h aufgeheizt. (Ursprünglich war eine Aufheizgeschwindigkeit von 5 K/h geplant gewesen; aus versuchstechnischen Gründen mußte sie jedoch etwas erhöht werden).
- Beim Temperierungsprogramm II werden die Proben "schnell" aufgeheizt. Die Aufheizgeschwindigkeit beträgt hier rund 20 K/h .

- Beim Temperierungsprogramm III erfolgt eine "stufenweise" Aufheizung. Zunächst werden die Proben mit konstanter Aufheizgeschwindigkeit von 5 K/h auf 120 °C erwärmt. Nach einer 24-stündigen Haltezeit erfolgt die Aufheizung mit rd. 20 K/h auf die angestrebte Prüftemperatur.

Als Prüftemperaturen wurden 400 °C, 500 °C und 600 °C vorgesehen. Die Haltezeit bei der jeweiligen Versuchstemperatur beträgt bei allen Probekörpern einheitlich 2 h.

Nach der Durchführung der σ - ϵ -Versuche zum Zeitpunkt t^* wird jeweils die elektrische Heizung abgestellt und die Proben kühlen unregelt ab. Die entsprechenden Temperaturverläufe sind in Bild 2 jeweils als gestrichelte Linien dargestellt.

Zusätzlich in das Programm aufgenommen wurden Versuche zur Bestimmung der thermischen Ausdehnung: Pro Betonsorte wurden dazu jeweils zwei Proben (\varnothing 80 mm, $l = 240$ mm) mit geringer Last (etwa $0,1 \text{ N/mm}^2$) in die Prüfmaschine eingebaut und entsprechend dem Temperaturprogramm I (eine Probe) und entsprechend dem Temperaturprogramm III (eine zweite Probe) bis auf 600 °C aufgeheizt. Die Messungen und Prüfungen erfolgen in gleicher Weise wie bei den zuvor beschriebenen Festigkeitsproben.

4. Versuchsergebnisse

4.1 Gesamtverformungen von belasteten Proben während der Aufheizung

Die gemessenen Gesamtverformungen während der Temperierung der Proben entsprechend den unterschiedlichen Temperaturprogrammen gemäß Bild 2 sind in den Bildern 4 bis 9 zusammengestellt. Im oberen Teil der Bilder sind jeweils die mittleren, auf den Probenoberflächen gemessenen Temperaturen und im unteren Teil der Bilder die Gesamtverformungen über der Versuchsdauer dargestellt. Dabei sind zum Zeitpunkt $t = 0$, mit dem die Aufheizung beginnt, jeweils die elastischen Verformungen zum Belastungsbeginn bei Raumtemperatur aufgetragen. Die Gesamtverformung 0 ‰ repräsentiert also die Ausgangslänge der Proben vor der ersten Belastung, die Längenänderungen sind auf diesen Zustand bezogen.

Bild 4, das die Temperaturverläufe und Gesamtverformungen von langsam aufgeheizten Basaltbetonproben zeigt, kann man entnehmen, daß die geplante Aufheizgeschwindigkeit von 5 K/h in den Versuchen leicht überschritten wurden. So wurden anstelle der genannten 5 K/h Aufheizgeschwindigkeiten von 6,5 K/h, 7,7 K/h und 9,4 K/h erreicht. Dies geht auf regelungstechnische Schwierigkeiten zurück. Auf die - jeweils einer bestimmten Temperatur zuzuordnenden - Gesamtverformungen scheinen die unterschiedlichen Aufheizgeschwindigkeiten kaum einen Einfluß zu haben. Alle Proben zeigen in der Anfangsphase der Aufheizung Ausdehnungen. Sie erreichen je nach der erreichten Aufheizgeschwindigkeit zwischen 6 und 10 h das Maximum. Dieses Ausdehnungsmaximum liegt bei allen 3 Proben bei Temperaturen zwischen 80 und 90 °C.

Nach dem Überschreiten des Maximums gehen die Ausdehnungen auch bei weiterer Temperaturerhöhung wieder zurück und es treten zunehmend Verkürzungen auf. Zunächst im Laufe der weiteren Temperaturerhöhung recht langsam, jedoch nach dem Überschreiten von 100 °C relativ rasch.

Nach etwa 16- bis 20-stündiger Temperierung beobachtet man ein geringfügig geneigtes Plateau, d. h. die Verkürzungen infolge des Schwindens und Kriechens werden durch die thermische Ausdehnung fast kompensiert. Der dazugehörige Temperaturbereich umfaßt etwa 150 bis 350 °C.

Oberhalb von 350 °C, d. h. nach Temperierungsdauer zwischen 32 h und 40 h, nehmen die Verkürzungen wieder stärker mit der Temperaturerhöhung zu. Eine Umkehrung dieser Tendenz ist nur bei der Probe A8 nach 54 h zu erkennen. Hier dehnt sich die Probe im Zuge der Quarzinversion wieder aus.

Nach dem Erreichen und Konstanthalten der Endtemperaturen treten wiederum verstärkt Verkürzungen auf, weil den entsprechenden Kriechverformungen keine thermischen Ausdehnungen der Probe mehr überlagert werden.

Bild 5 zeigt das Verhalten der Basaltbetonproben bei schneller Aufheizung. Bei den Proben A2 und A3 wurde die angestrebte Aufheizgeschwindigkeit von 20 K/h mit 18 K/h und 20,2 K/h nahezu erreicht. Bei der Probe A5 begann die Aufheizung infolge eines Bedienungsfehlers erst nach 16 h nach dem Einbau und der Belastung mit 15 N/mm²; außerdem wurde die angestrebte Aufheizgeschwindigkeit mit den erreichten 12,6 K/h deutlich unterschritten. Es ist aber zu erkennen, daß bei allen drei Proben zwar zeitversetzte, aber nahezu

identische Verläufe der Gesamtverformungen gemessen wurden. Auch bei schneller Aufheizung überwiegen bis zu Temperaturen von etwa 100 °C die Ausdehnungen. Nach dem Überschreiten von 100 °C setzen dann wiederum starke Verkürzungen ein, die ab 150 °C in ein Plateau einschwenken. Oberhalb 350 °C nehmen die Verkürzungen bei den Proben A2 und A5 wieder stärker mit der Temperatur zu und oberhalb 570 °C zeigt sich dann bei Probe A5 auch wieder eine starke Expansion infolge der Quarzumwandlung. Probe A3 zeigt oberhalb von 300 °C ein etwas von den anderen Proben abweichendes Verhalten. Dies könnte auch als Exemplarstreuung aufgefaßt werden, denn im Vergleich zur thermischen Ausdehnung ist die Abweichung der Gesamtverformung der Probe A3 von den Gesamtverformungen der anderen beiden Proben als gering zu erachten.

Die Gesamtverformungen der stufenförmig nach dem Temperaturprogramm III aufgeheizten Basaltbetonproben sind in Bild 6 zusammengestellt. Im Anfangsbereich der Aufheizung ist bis zum Erreichen der Haltetemperatur 120 °C ein ähnlicher Verlauf der Betonverformungen zu beobachten wie bei den mit vergleichbarer Geschwindigkeit aufgeheizten Basaltbetonproben (vgl. Bild 4). Während der 24-stündigen Haltezeit kriechen die Proben um durchschnittlich 0,7 ‰.

Wird die Temperatur der Proben nach dem Ende der Haltezeit wieder gesteigert, so dehnen sich die Proben - im Gegensatz zu kontinuierlich aufgeheizten Proben - zunächst aus. Erst wenn die Probentemperatur die Haltetemperatur um ca. 80 °C überschritten hat, werden wieder Gesamtverformungen in vergleichbarer Größe wie bei der kontinuierlichen Aufheizung gemessen. Der weitere Verlauf der Gesamtverformungen verläuft dann wie bei der kontinuierlichen Erstaufheizung.

Die Verformungskurven der Rheinkiesbetonproben (s. Bild 7, 8 und 9) unterscheiden sich nur geringfügig von den entsprechenden Kurven des Basaltbetons. Auch die Rheinkiesbetonproben dehnen sich bei Beginn der Aufheizung zunächst aus und verkürzen sich nach dem Überschreiten von ca. 100 °C. Ursache dafür sind die starken, sich überlagernden Schwind- und Kriechverformungen des Zementsteins, die erst oberhalb von ca. 160 bis 170 °C durch die thermische Ausdehnung der Zuschläge kompensiert werden. Im sich anschließenden höheren Temperaturbereich folgt jedoch im Gegensatz zu den Basaltbetonproben mit der Temperaturerhöhung ein kontinuierliches, stärkeres

Ausdehnen der Proben, das sich im Zuge der Quarzumwandlung nochmals deutlich verstärkt.

Bei den stufenförmig aufgeheizten Proben treten während der Haltezeit bei 120 °C Kriechverformungen in etwa gleicher Größe auf, wie beim Basaltbeton: 0,72 ‰ beim Rheinkiesbeton und 0,71 ‰ beim Basaltbeton. Auch das Verhalten der Rheinkiesbetonproben in der Aufheizphase nach Beendigung der Haltezeit ist mit dem der Basaltbetonproben vergleichbar (vgl. Bilder 6 und 9): Zu Beginn der Aufheizung steigen die Dehnungen der Proben etwas stärker an als bei der kontinuierlichen Erstaufheizung, um nach Erreichen von 200 °C in die Kurven der kontinuierlichen Erstaufheizung einzumünden.

Zur weiteren Analyse der instationären Verformungen während der Aufheizung hat es sich als vorteilhaft erwiesen, die während der Aufheizung gemessenen Gesamtverformungen der Proben zunächst über der Temperatur aufzutragen, da die instationären Verformungen im allgemeinen sehr viel stärker von der Temperatur abhängen als von der Zeit. Die Bilder 10 bis 15 zeigen solche Auftragungen. Dabei wurden die elastischen Anfangsverformungen von den Gesamtverformungen abgezogen. Die in den Bilder 10 bis 15 dargestellten Werte repräsentieren daher jeweils die Summe aus instationärem Kriechen und thermischer Ausdehnung.

Im Temperaturbereich bis etwa 100 °C liegen diese Werte - insbesondere beim Basaltbeton - aber zum Teil auch beim Rheinkiesbeton in einem schmalen Band und lassen sich durch Mittelwertkurven annähern.

Nach dem Überschreiten von etwa 100 °C scheint die Aufheizgeschwindigkeit für den weiteren Temperaturverlauf der Verformungen stärker an Bedeutung zu gewinnen. Probekörper, die mit 5 K/h aufgeheizt worden sind (vgl. Bild 10 und 12; beim letzteren wegen des Haltens bei 120 °C nur den Temperaturbereich bis 120 °C), zeigen im Mittel einen Verlauf, der nahezu identisch ist mit den in /2/ und /3/ angegebenen Verformungsverläufen, die ja an Proben mit gleichartigen Abmessungen und bei gleichen Aufheizgeschwindigkeiten ermittelt worden waren. Dagegen entsprechen die Verformungen der schnelllaufgeheizten Proben eher den Verformungen, die an Zylindern mit größeren Durchmessern (Ø 15 cm) bei der niedrigeren konstanten Aufheizgeschwindigkeit von 5 K/h gemessen worden sind (vgl. /4/).

Schnellere Aufheizung oder größere Probenabmessungen scheinen die Verformungskurven in Richtung höherer Temperaturen zu verschieben. Dies läßt sich folgendermaßen erklären: Die angegebenen Temperaturen stellen die Oberflächentemperaturen dar. Bei unterschiedlichen Aufheizgeschwindigkeiten werden sich trotz gleicher Oberflächentemperaturen unterschiedliche Temperaturprofile und damit unterschiedliche mittlere Probentemperaturen erstellen. Ähnliches gilt für die Feuchteverteilung. Bei gleicher Oberflächentemperatur führen höhere Aufheizgeschwindigkeiten zu einem höheren Feuchtegradienten und einer höheren mittleren Feuchte, damit wird das Schwinden sozusagen verzögert und die vergleichbaren Schwindverkürzungen setzen erst bei höheren Probekörperoberflächentemperaturen ein. Beide Effekte (steilerer Temperaturgradient und steilerer Feuchtegradient bei schnellerer Aufheizung) können dazu führen, daß eine Verschiebung der Verformungskurven in Richtung höherer Temperaturen erfolgt, ohne daß für eine bestimmte Betonfaser des Probekörpers eine eigentliche Abhängigkeit des Verformungsverhaltens von der Aufheizgeschwindigkeit besteht.

Ähnliche Überlegungen lassen sich auch für das Verhalten von Proben mit unterschiedlichem Durchmesser anstellen, die mit der gleichen konstanten Aufheizgeschwindigkeit erwärmt werden: Nach der Fouriergleichung bzw. nach dem 2. Fickschen Gesetz stellen sich gleiche Temperatur- bzw. Feuchteverhältnisse ein, wenn die Aufheizgeschwindigkeiten zweier Proben (\dot{T}_1 und \dot{T}_2) sich umgekehrt proportional verhalten wie die Quadrate ihrer Durchmesser:

$$\frac{\dot{T}_1}{\dot{T}_2} = \frac{d_2^2}{d_1^2}$$

mit $d_1 = 8 \text{ cm}$, $d_2 = 15 \text{ cm}$, $\dot{T}_2 \approx 5,8 \text{ K/h}$

$$\dot{T}_1 = \dot{T}_2 \cdot 3,52$$

$$\dot{T}_1 \approx 20 \text{ K/h}$$

Das Ergebnis verdeutlicht, daß bei schnell aufgeheizten Proben ($\dot{T}_1 = 20 \text{ K/h}$) mit einem Durchmesser von 8 cm ähnliche thermische und hygrische Verhältnisse vorliegen wie bei langsam aufgeheizten Proben ($\dot{T}_2 \approx 5,8 \text{ K/h}$) mit größerem Durchmesser ($d_2 = 15 \text{ cm}$; vgl. auch /4/).

Die vorangestellten Erklärungen beziehen sich hauptsächlich auf die Temperaturen 100 °C bis 300 °C. Bei höheren Temperaturen geht die Entwässerung der Proben infolge des hohen Wasserdampfpartialdruck vermutlich so schnell von statten, daß die mit einem Feuchtegradienten verbundenen Effekte nur noch von untergeordneter Bedeutung sein dürfen. Es ist zu vermuten, daß die zu beobachtenden geringen Verschiebungen zwischen den Verformungskurven schnell und langsam aufgeheizter Proben hauptsächlich auf die unterschiedlichen Temperaturverteilungen in den schnell und in den langsam aufgeheizten Proben beruhen. Darüberhinaus könnten sich jedoch auch bei den langsam aufgeheizten Proben den instationären Kriechverformungen Verformungsanteile aus dem stationären Kriechen überlagert haben, das bei den höheren Temperaturen bekanntermaßen mit höherer Anfangsgeschwindigkeit abläuft als bei niedrigeren Temperaturen.

Ähnliche Phänomene wie beim Basaltbeton treten auch beim Rheinkiesbeton zutage (vgl. Bilder 13, 14 und 15). Auch beim Rheinkiesbeton verlaufen die Verformungskurven der langsam aufgelösten Proben fast identisch mit den in /2/ und /3/ gemessenen Kurven, während die schnell aufgeheizten Proben eine stärkere Ähnlichkeit mit den langsam aufgeheizten, stärkeren Zylindern aufweisen (siehe /4/).

Stärkere Unterschiede zwischen Basaltbeton und Rheinkiesbeton treten im Verformungsverhalten erst bei Temperaturen oberhalb von 170 °C auf. In diesem Temperaturbereich macht sich die höhere thermische Ausdehnung des Rheinkieszuschlags bemerkbar. Während die Summe aus thermischer Dehnung und instationärem Kriechen beim Basaltbeton monoton von 90 °C bis etwa 550 °C abnimmt, steigt die Summe beim Rheinkiesbeton oberhalb 200 °C beinahe monoton bis 600 °C an.

Im Verlauf des Temperaturanstiegs von 120 °C auf 400, 500 bzw. 600 °C (nach vorherigem Halten bei 120 °C) ergeben sich anfänglich andere instationäre Verformungen als beim erstmaligen Aufheizen. Jedoch münden die Kurven beider Betone nach einer Temperaturerhöhung von ca. 80 °C (gerechnet von der Haltetemperatur 120 °C an) in die jungfräuliche Kurve ein.

Die stationären Kriechverformungen bei 120 °C (Haltephase) stimmen bei beiden Betonen im Mittel nahezu überein. Sie betragen ca. 0,71 ‰ und sind vergleichbar mit den in /4/ an Zylindern mit einem Durchmesser von 15 cm gemessenen Werte.

Bei erster Betrachtung der Meßwerte in den Bildern 10 bis 15 scheinen die Streuungen zwischen den Ergebnissen der einzelnen Proben recht hoch zu sein. Der Vergleich mit Ergebnissen aus anderen Untersuchungen (siehe z. B. /6/, /7/ und /8/ zeigt jedoch, daß ganz allgemein aufgrund der im Beton bei Erhitzung ablaufenden Phänomene (s. /9/) mit Streuungen von $\pm 0,5$ ‰ bei Temperaturen oberhalb von 300 °C zu rechnen ist.

4.2 Thermische Ausdehnung der Proben

Die Bestimmung der thermischen Ausdehnung erfolgte - wie bereits kurz in Kapitel 3.2 erwähnt wurde - ebenfalls an Zylindern mit Durchmesser 8 cm und einer Länge von 24 cm. Die Proben wurden dazu mit einer geringen Last vorbelastet, dreimal bis 15 N/mm² zur E-Modulbestimmung be- und entlastet und anschließend aufgeheizt. Die Aufheizung erfolgte auf zwei verschiedene Arten:

- Aufheizung mit konstanter Aufheizgeschwindigkeit von 5 K/h auf ca. 600 °C
- stufenförmige Aufheizung, hier wurden die Proben zunächst mit 5 K/h auf 120 °C aufgeheizt, daran schloß sich eine 24-stündige Haltezeit bei 120 °C an und anschließend erfolgte die kontinuierliche Aufheizung mit 5 K/h auf 600 °C.

Je Betonart wurden 2 Proben untersucht; jeweils eine Probe mit kontinuierlicher Aufheizung und eine Probe mit stufenförmiger Aufheizung. Die Ergebnisse sind in den Bildern 16 und 17 für Basalt- und Rheinkiesbeton dargestellt.

Sowohl beim Basaltbeton als auch beim Rheinkiesbeton fallen die Streuungen der Meßergebnisse bis zu Temperaturen von 200 °C bis 500 °C sehr gering aus. Die gemessenen thermischen Ausdehnungen stimmen in diesem Temperaturbereich auch sehr gut mit den in /2, 3/ und /4/ ermittelten Werten überein.

Während der ca. 24-stündigen Haltezeit bei 120 °C treten nur sehr geringe Verkürzungen der Proben auf. Sie liegen unabhängig von der Betonart bei ca. 0,1 ‰.

Vergleicht man die thermischen Ausdehnungen - beispielsweise des Basaltbetons -, die bei kontinuierlicher Aufheizung gemessen worden sind mit den thermischen Ausdehnungen, die bei stufenförmigem Temperaturanstieg erhalten wurde, so kann man feststellen, daß bei den stufenförmig aufgeheizten Proben die Ausdehnungen, die während des Wiederanstiegs der Temperatur (nach Beendigung der Haltephase) auftreten, etwas oberhalb der thermischen Ausdehnungen liegen, die man bei kontinuierlichem Temperaturanstieg erhält. Da das beschriebene Phänomen sowohl beim Rheinkiesbeton als auch beim Basaltbeton auftreten, muß gefolgert werden, daß das Verhalten mit der langen Austrocknungszeit während des Haltens bei 150 °C zusammenhängt. Sowohl im Bild 16 als auch im Bild 17 ist zu erkennen, daß der Anstieg der thermischen Ausdehnung nach der langandauernden Austrocknung bei 120 °C im Temperaturbereich 150 °C bis etwa 350 °C steiler beginnt als bei den kontinuierlich aufgeheizten Proben. Erklärt werden kann das Verhalten damit, daß im Zementstein des Betons, der durch die langandauernde Temperierung bei 120 °C fast vollständig ausgetrocknet worden ist, kaum noch Schwindvorgänge während des Durchlaufens des Temperaturbereichs 120 °C bis etwa 350 °C ablaufen; also praktisch nur noch die Feststoffdehnungen der Zementsteinmatrix und der Zuschläge nach außen weitergegeben werden, während bei kontinuierlicher Aufheizung auch in dem Temperaturbereich 120 °C bis 300 °C die Feststoffausdehnung des Zementsteins durch das entwässerungsbedingte Schwinden überlagert wird. Zusätzlich werden offenbar Gefügespannungen in dem teilweise noch feuchten Zementstein leichter abgebaut und die summarisch von außen meßbare thermische Ausdehnung bleibt geringer als bei (durch die stufenförmige Aufheizung) getrocknetem Zementstein. Die gegebene Erklärung findet dadurch eine Bestätigung, daß die Differenz der thermischen Ausdehnung von kontinuierlich aufgeheizten Proben und von stufenförmig aufgeheizten Proben oberhalb von 300 °C etwa gleich groß bleibt. Denn oberhalb von 250 bis 300 °C dürfte der Zementstein das physikalisch gebundene Wasser restlos abgegeben haben, so daß die Einflüsse aus diesem Parameter verschwinden dürften.

Es muß jedoch daraufhin gewiesen werden, daß ein Teil der in den Bildern 16 und 17 zu beobachtende Abweichungen der Meßwerte voneinander auf Exemplars-trennungen beruhen können. In /4/ wurde beobachtet, daß die Streuungen der Meßergebnisse beim Basaltbeton sehr gering ausfielen. Demgegenüber zeigten die einzelnen Rheinkiesbetonproben stärkere Abweichungen vom Mittelwert, insbesondere nach Überschreiten von 120 °C. Diese stärkeren Streuungen setzen bei den Temperaturen ein, bei denen der Rheinkieszuschlag einen progressiven Anstieg der thermischen Ausdehnung zeigt /7, 8/. Da beim Zementstein bei der gleichen Temperatur ein starkes Schrumpfen einsetzt, ist gleichzeitig mit einer verstärkten Mikrorißbildung zu rechnen. Diese Mikrorißbildung ist jedoch ein Zufallsprozeß; insbesondere unterliegen die Rohdichten und Rißweiten starken Variationen von Probe zu Probe und somit auch die gemessenen thermischen Ausdehnungen /6/. Beim Basaltbeton sind die Dehnungsdifferenzen zwischen Zuschlag und Zementstein kleiner. Damit fallen auch die Mikrorißbildungen geringer aus und - resultierend daraus - ergeben sich geringere Streuungen in den thermischen Ausdehnungen.

Vergleicht man die thermischen Ausdehnungen des Basaltbetons und des Rheinkiesbetons, so kann man feststellen, daß sich bis etwa 170 °C kaum Unterschiede bemerkbar machen. Im Temperaturbereich 20 °C bis etwa 100 °C zeigen beide Betone den stärksten Anstieg der Ausdehnungen. Ab 100 °C bis 180 °C verringert sich bei beiden Betonen der Anstieg der Ausdehnungen stark. Ursache dafür sind die ab 100 °C einsetzenden verstärkten Entwässerungsreaktionen. Dadurch schwindet der Zementstein so stark, daß die Ausdehnungen der Zuschläge fast kompensiert werden. Erst nachdem der größte Teil der Entwässerungsreaktionen abgeschlossen ist (ca. 170 °C bei der vorliegenden Betondichtigkeit und Probendimension), geht das starke Schwinden des Zementsteins zurück, und die Ausdehnungen der Grobzuschläge bestimmen zusammen mit der Mikrorißbildung weitgehend das Ausdehnungsverhalten. Daher dehnt sich auch der Rheinkiesbeton ab etwa 170 °C deutlich stärker aus als der Basaltbeton.

4.3 Instationäre Kriechverformungen während der Aufheizung

Zur Berechnung des instationären Kriechens wurde von den Darstellungen in den Bildern 10 bis 15 ausgegangen. Von den dort angegebenen Werten ist der Differenz aus Gesamtverformung (ϵ_{tot}) und elastischer Anfangsverformung

$\sigma/\varepsilon(20\text{ }^{\circ}\text{C})$ gemäß der gewählten Definitionsgleichung für die instationären Kriechverformungen ($\varepsilon_{tr}(\sigma, T)$):

$$\varepsilon_{tot} = \varepsilon_{th}(T) + \varepsilon_{el}(\sigma) + \varepsilon_{tr}(\sigma, T) \quad (1)$$

bzw.

$$\varepsilon_{tot} - \frac{\sigma}{E(20^{\circ}\text{C})} = \varepsilon_{th}(T) + \varepsilon_{tr}(\sigma, T) \quad (2)$$

noch die thermische Dehnung (ε_{th}) zu subtrahieren:

$$\varepsilon_{tr}(\sigma, T) = \varepsilon_{tot} - \frac{\sigma}{E(20^{\circ}\text{C})} - \varepsilon_{th}(T) \quad (3)$$

Dazu wurde auf die in den Bildern 16 und 17 dargestellten thermischen Ausdehnungen von Basaltbeton und Rheinkiesbeton zurückgegriffen, und zwar auf jeweils die bei kontinuierlicher Aufheizung gemessenen Kurven.

Die Ergebnisse der Auswertungen sind in den Bildern 18 bis 23 dargestellt. Neben den jeweiligen Einzelwerten der bestimmten Proben enthalten die Bilder als durchgezogene Linie den Mittelwert der instationären Kriechverformung der drei gleichartig aufgeheizten Proben, sowie als gestrichelte Linie den Mittelwert aller Proben einer Betonsorte. Bei der Ermittlung der zuletzt genannten Mittelwerte wurden die Werte der stufenförmig aufgeheizten Proben aus dem Temperaturbereich 120 °C bis 200 °C nicht mit berücksichtigt, weil die thermisch-hygrischen Verhältnisse und somit das Kriechverhalten infolge der 24-stündigen Haltezeit bei 120 °C nicht mit den entsprechenden Verhältnissen der kontinuierlich aufgeheizten Proben vergleichbar sind.

Den Bildern kann man entnehmen, daß die Einzelwerte (s. z. B. Bild 18) in einem relativ schmalen Band liegen und leicht durch eine Mittelwertkurve annähern lassen. Vergleicht man bei dem Basalt die Bilder 18 und 19 so erhält man zunächst den Eindruck, daß die Aufheizgeschwindigkeit einen erheblichen Einfluß auf die Werte des instationären Kriechens bis 600 °C ausüben würde. Denn, bei den langsam aufgeheizten Basaltbetonprobekörper (s. Bild 18) liegt die Mittelwertkurve für die untersuchten Proben A12, A10 und A8 immer über dem Mittelwert aller Basaltbetonproben, während es bei den schnell aufgeheizten Proben genau umgekehrt erscheint. Hier zeigen die

schnell aufgeheizten Proben ein deutlich geringeres instationäres Kriechen. Bild 20 macht aber deutlich, daß der Einfluß der Aufheizgeschwindigkeit nicht überschätzt werden darf. Denn in Bild 20 unterscheiden sich die Mittelwerte der stufenförmig aufgeheizten Proben A4, A11 und A.., die im Temperaturbereich 120 °C bis 600 °C ebenfalls schnell aufgeheizt worden sind, kaum von dem Mittelwert des instationären Kriechens der Gesamtheit aller untersuchten Basaltbetonproben.

Die Ergebnisse, die mit dem Rheinkiesbeton erhalten wurden (s. Bilder 21 und 22) unterstreichen, die oben gemachte Aussage, daß das instationäre Kriechen von der Aufheizgeschwindigkeit nur sehr geringfügig abhängt: Zum einen liegen hier die Versuchsergebnisse, die mit den einzelnen Proben erhalten worden sind, noch enger um den Mittelwert zusammen als bei dem Basaltbeton. Zum anderen schneiden sich häufig die Mittelwertkurven des gesamten Probenkollektivs (gestrichelte Linie) mit den Mittelwertkurven für gleichartig aufgeheizte Proben (durchgezogene Linien).

Zu den stufenartig aufgeheizten Proben (s. Bilder 20 und 23) ist folgendes zu bemerken: Im Temperaturbereich bis 120 °C wurden die Proben langsam aufgeheizt (ca. 5 K/h). In diesem Temperaturbereich folgt der Mittelwert dem Mittelwert des Gesamtprobenkollektivs. Während der Haltephase kriechen die Proben (stationär) sowohl beim Basaltbeton als auch beim Rheinkiesbeton um 0,7 ‰. Im Zuge der weiteren Aufheizung (bis etwa 200 °C) ist sowohl beim Rheinkiesbeton als auch beim Basaltbeton kaum instationäres Kriechen festzustellen. Die Kurven verlaufen bis nahezu 200 °C parallel zur Temperaturachse. Oberhalb von 200 °C - beim Basaltbeton bereits ab etwa 170 °C - münden die Kurven des instationären Kriechens (der stufenförmig aufgeheizten Proben) bereits wieder in die Kurven (gestrichelte Linien) der in einem Zuge von 20 °C auf 600 °C aufgeheizten Proben. Dieses Ergebnis bestätigt die in /4/ bereits gemachten Erfahrungen, daß die thermisch-mechanische Vorgeschichte nach einer Temperaturerhöhung von ca. 80 °C kaum noch eine Rolle für das Verhalten des Betons bei weiterer Temperaturerhöhung spielt.

Zusammenfassend sind die Ergebnisse der Untersuchungen, diesmal als bezogene instationäre Kriechverformungen gemäß der nachfolgenden Gleichung

$$\varepsilon_{tr}(\sigma, T) = \varepsilon_{tr}(\sigma, T) / \sigma$$

dargestellt. Man erkennt, daß sich die bezogenen Kriechverformungen des Basaltbetons nur sehr geringsfügig von den Kriechverformungen des Rheinkiesbetons unterscheiden. Die Differenzen zwischen den beiden Kriechfunktionen liegen im allgemeinen innerhalb der Streubereiche der Versuchsergebnisse bei gleichartiger Aufheizung von Proben eines Betons.

Ein Vergleich der Ergebnisse, die in Bild 24 dargestellt sind, mit den Ergebnissen früherer Untersuchungen zeigt, daß beispielsweise bei 200 °C die Versuchsergebnisse, die mit den Proben mit 15 cm Durchmesser (vgl. /4/) und den dünneren Zylindern mit 8 cm Durchmesser (vgl. /2/ und /3/) bei unterschiedlicher Belastung der Proben erzielt worden sind, fast identisch ausfallen. Auch bei 100 °C koinzidieren die hier in Bild 24 dargestellten Ergebnisse mit den Ergebnissen der früheren Untersuchungen.

Zusammenfassend kann man feststellen, daß das instationäre Kriechen sowohl beim Basaltbeton als auch beim Rheinkiesbeton bis etwa 40 °C sehr gering ist. Im anschließenden Temperaturbereich kann man die Kurven für das bezogene instationäre Kriechen bis etwa 400 °C in guter Näherung mit einer Geraden beschreiben. Oberhalb 400 °C nimmt das instationäre Kriechen mit weiterer Temperaturerhöhung progressiv zu. Wobei zu bemerken ist, daß Basaltbeton bei den höheren Temperaturen - etwa ab 300 °C - gegenüber dem Rheinkiesbeton etwas geringeres bezogenes instationäres Kriechen aufweist. Bei 600 °C liegen die bezogenen instationären Kriechwerte beim Basaltbeton bei ca. $-0,62 \cdot 10^{-3} \text{ mm}^2/\text{N}$ und bei Rheinkiesbeton bei ca. $-0,70 \cdot 10^{-3} \text{ mm}^2/\text{N}$.

Zusammenfassend ist zu bemerken, daß sich der Rheinkiesbeton und der Basaltbeton hinsichtlich des instationären Kriechens aufgrund des fast gleichen mikrostrukturellen Aufbaus und Gehalts ihrer Bindemittelphase fast identisch verhalten. Die Unterschiede bei den Gesamtverformungen können fast ausschließlich dem unterschiedlichen Ausdehnungsverhalten der Grobzuschläge zugeschrieben werden.

4.4 Ergebnisse der σ - ϵ -Versuche bei hohen Temperaturen

Die Ergebnisse der σ - ϵ -Versuche bei hohen Temperaturen sind für den Basaltbeton in den Bildern 25, 26 und 27 und für den Rheinkiesbeton in den Bildern 28, 29 und 30 dargestellt. Die gemessenen Festigkeiten und E-Moduln enthalten die Tabellen 4 und 5.

Den Bildern 25 und 26 sowie 28 und 29 ist zu entnehmen, daß alle Proben kurz nach Überschreiten der jeweiligen Höchstlast schlagartig versagten. Dies, obwohl die Prüfungen der Proben mit konstanter Dehnungsgeschwindigkeit - also dehnungsgeregelt - durchgeführt worden sind. Offenbar reichte die Maschinensteifigkeit bzw. die Regelungsgeschwindigkeit der Prüfmaschinen nicht aus, um die während der Belastung der Proben im System gespeicherte elastische Energie schnell genug abzubauen.

In Bild 25 ist der mittlere Verlauf, der mit den Proben A6, A7 und A9 gemessenen σ - ϵ -Kurven, wiedergegeben. Auf eine Wiedergabe der einzelnen σ - ϵ -Linien konnte verzichtet werden, da die jeweiligen Meßwerte der einzelnen Proben nur sehr geringfügig voneinander abweichen. Darunter ist der Mittelwert der σ - ϵ -Kurven der Proben A2 und A12 angegeben, also der Proben, die kontinuierlich aufgeheizt worden sind. Die Streuung der Einzelmeßwerte ist zwischen den beiden Proben ebenfalls sehr gering. Etwas abweichend davon verläuft die σ - ϵ -Linie der stufenförmig aufgeheizten Probe A4.

Dem Bild 25 kann man entnehmen, daß sowohl der E-Modul als auch die Festigkeit der mit 400 °C belasteten Proben gegenüber den thermisch unbelasteten Proben etwa auf die Hälfte zurückgegangen ist. Überraschend ist bei den Ergebnissen, daß sich die Bruchstauchungen der unterschiedlich temperierten Proben kaum voneinander unterscheiden.

Ein ähnliches Verhalten, wie bei den mit 400 °C beanspruchten Proben ist auch bei den mit 500 °C und 600 °C beaufschlagten Proben festzustellen (vgl. Bild 26). Auch hier sind der E-Modul und die Festigkeit gegenüber den thermisch unbeanspruchten Proben (vgl. Bild 25) etwa auf die Hälfte zurückgegangen, während sich die Bruchstauchung sogar geringfügig gegenüber den Referenzproben vermindert hat. Ebenso wie bei den 400 °C-Proben unterscheiden sich die σ - ϵ -Linien der bis zu 500 °C bzw. 600 °C langsam bzw. schnell

aufgeheizten Proben kaum voneinander, während die jeweils stufenförmig auf 500 °C bzw. 600 °C aufgeheizten Proben hinsichtlich der σ - ϵ -Kurven wiederum stärker von den kontinuierlich aufgeheizten Proben abweichen.

Bei den mechanisch während der Aufheizung unbeanspruchte auf 600 °C aufgeheizten Proben sind deutlich stärkere Reduktion des E-Moduls und der Festigkeit festzustellen als bei den vergleichbaren Proben, die unter mechanischer Belastung auf 600 °C aufgeheizt worden sind. Gleichzeitig ist bei den mechanisch unbelastet aufgeheizten Proben in Bild 27 die Bruchstauchung um das 5- bis 6-fache größer als bei den belasteten Proben.

Tabelle 4, die die E-Moduln und Festigkeiten der Basaltbetonproben nach unterschiedlicher Temperierung enthält, macht ebenfalls deutlich, daß der Festigkeitsverlust thermisch belasteter Proben bis zu Temperaturen von 600 °C eher gering ausfällt. So beträgt die Festigkeit bei 400 °C nur 57,8 % der Festigkeit der thermisch unbelasteten Proben. Während die Festigkeit nach der Temperaturerhöhung auf 500 °C auf 52,5 % abfällt bzw. bei 600 °C auf 47,2 %, geht die Festigkeit der mechanisch unbelasteten Proben bei 600 °C auf ca. 1/5 der Ausgangsfestigkeit zurück.

Tabelle 4: E-Moduln und Festigkeit der Basaltbetonproben

Probe Nr.	Temperatur [°C]	Temperatur Programm	Festigkeit [N/mm²]	bezogene Festigkeit [%]	E-Modul [kN/mm²]	bezogener E-Modul [%]
A 6	20	-	63,7	100,2	41,6	92,9
A 7	20	-	63,3	99,5	49,6	110,7
A 9	20	-	63,7	100,2	43,1	96,2
			$\bar{x} = 63,6$	100,0	44,8	100,0
A 12	400	I	37,6	59,1	25,0	55,8
A 2	400	II	37,0	58,2	25,4	56,7
A 4	400	III	35,8	56,3	24,7	55,1
			$\bar{x} = 36,8$	57,8	25,0	55,8
A 10	500	I	34,6	54,4	25,6	57,1
A 3	500	II	33,4	52,5	24,4	54,5
A 11	500	III	32,2	50,6	27,1	60,5
			$\bar{x} = 33,4$	52,5	25,7	57,4
A 5	600	I	30,6	48,1	23,9	53,3
A 8	600	II	30,1	47,3	21,4	47,8
A 1	600	III	29,3	46,1	20,7	46,2
			$\bar{x} = 30,0$	47,2	22,0	49,1
A 227	600	$\epsilon_{th, I}$	16,3	25,6	5,9	13,2
A 222	600	$\epsilon_{th, III}$	17,0	26,7	3,9	8,7

Betrachtet man die unterschiedlichen Arten der Aufheizung, so kann man feststellen, daß i. a. eine langsame Temperierung jeweils ein etwas geringeren Festigkeitsabfall verursacht als die etwas schnellere Aufheizung. Jedoch ist der Unterschied äußerst gering. Er beträgt beim Basalt im Durchschnitt nur 1 bis 2 %. Etwas stärker ist beim Basaltbeton ebenfalls die Reduktion der Festigkeit ausgefallen bei den Proben, die stufenförmig, d. h., mit einer Haltezeit von 24 h bei 120 °C aufgeheizt worden sind. Gegenüber den langsam aufgeheizten Proben ist der Festigkeitsverlust der stufenförmig aufgeheizten Proben um 2 bis 4 % höher. Bei den mechanisch während der Temperierung unbelasteten Proben scheint sich die Haltestufe kaum noch auszuwirken.

Der E-Modul der Proben geht bei den mechanisch belasteten Proben in etwa im gleichen Umfang zurück wie die Festigkeit. Eine Tendenz, daß hier die unterschiedlichen Temperierungsarten einen Einfluß auf die Reduktion des E-Modulabfalls haben, ist aus den Versuchsergebnissen nicht ablesbar.

Eine besondere Beachtung verdient die Tatsache, daß der E-Modul der unbelasteten Proben sehr viel stärker abfällt, als beispielsweise die Festigkeit. Während die Festigkeit bei 600 °C um ein Viertel des Ausgangswertes zurückgeht, ist beim E-Modul eine Reduktion auf ca. ein Zehntel des Ausgangswertes gemessen worden.

Bezüglich der Spannungs-Dehnungs-Berechnungen treffen für den Rheinkiesbeton die gleichen Feststellungen zu, wie für den Basaltbeton (vgl. Bild 28 bis 30). Auch beim Rheinkiesbeton sinken der E-Modul und die Festigkeit der belasteten Proben infolge der Aufheizung gegenüber den Referenzwerten deutlich ab, während sich die Bruchstauchungen nur geringfügig verändern.

Auch beim Rheinkiesbeton ist festzustellen, daß die Festigkeits- und E-Modulabnahme bei den mechanisch unbelasteten Proben besonders hoch ausfällt und das gleichzeitig die Bruchstauchungen erheblich zunehmen.

Aus der Tabelle 5, die die E-Moduln und Festigkeiten der Rheinkiesbetonproben wiedergibt, geht nicht so klar wie bei den Basaltbetonproben hervor, daß eine langsame Aufheizung zu niedrigeren Hochtemperaturfestigkeiten führt als eine schnelle Aufheizung. Jedoch ist wiederum festzustellen, daß die stufenförmige Temperierung sowohl bei 400 °C als auch bei 500 °C und 600 °C jeweils die niedrigsten Festigkeiten liefert.

Bei den E-Modulwerten ist, wie bereits bei der Diskussion der Versuchsdaten des Basaltbetons festgestellt wurde, kein Zusammenhang zwischen Temperierungsart und E-Modulverlust festzustellen.

Tabelle 5: E-Moduln und Festigkeit der Rheinkiesbetonproben

Probe Nr.	Temperatur [°C]	Temperatur Programm	Festigkeit [N/mm²]	bezogene Festigkeit [%]	E-Modul [kN/mm²]	bezogener E-Modul [%]
R 130	20	-	74,4	105,2	40,1	97,4
R 104	20	-	67,2	95,0	47,2	114,7
R 127	20	-	70,4	99,6	36,2	87,9
			$\bar{x} = 70,7$	100,0	41,2	100,0
R ...	400	I	38,0	53,7	26,7	64,9
R 119	400	II	40,4	57,1	23,2	56,4
R 136	400	III	37,8	53,5	25,2	61,2
			$\bar{x} = 38,7$	54,7	25,0	60,7
R 101	500	I	33,0	46,7	20,3	49,3
R 105	500	II	35,0	49,5	16,8	40,8
R 132	500	III	29,4	41,6	20,0	48,6
			$\bar{x} = 32,5$	46,0	19,0	46,2
R 125	600	I	29,4	41,6	18,1	44,0
R 123	600	II	28,0	39,6	13,7	33,3
R 134	600	III	26,1	36,9	18,1	44,0
			$\bar{x} = 27,8$	39,3	16,6	40,3
R 133	600	ϵ_{th} , I	17,0	24,1	4,97	12,1
R 103	600	ϵ_{th} , III	16,2	22,9	5,73	13,9

Der Vergleich der mit Rheinkiesbeton und Basaltbeton erzielten Ergebnisse macht deutlich, daß der Rheinkiesbeton prozentual bei 400, 500 und 600 °C stärker an Festigkeit verliert als der Basaltbeton. Hinsichtlich der Festigkeit unterschreitet der Rheinkiesbeton den Basaltbeton, absolut gesehen, aber erst bei etwa 600 °C

Zusammenfassend kann festgestellt werden, daß der Rheinkiesbeton und der Basaltbeton sich bei den hohen Temperaturen hinsichtlich des Spannungs-Dehnungs-Verhaltens, der Festigkeit und der Elastizität nur geringfügig unterscheiden. Beachtenswert ist die hohe Festigkeit des Reaktorbetons, selbst bei sehr hohen Temperaturen.

5. Zusammenfassung

Berichtet wird über Hochtemperaturfestigkeitsuntersuchungen an unversiegelten HTR-Betonproben aus Basaltbeton und aus Rheinkiesbeton. Die Untersuchungen waren notwendig geworden, weil im Rahmen des bisherigen F + E-Betonprogramms nur Temperaturen bis 300 °C berücksichtigt worden sind, die Betrachtung hypothetischer Störfälle es aber erfordert, entsprechende Festigkeits- und Verformungsdaten wenigstens bis zu Temperaturen von 600 °C verfügbar zu haben.

Die Versuche wurden an zylindrischen Probekörpern mit einem Durchmesser von 8 cm und einer Länge von 24 cm auf Hochtemperaturprüfständen des Instituts für Baustoffe, Massivbau und Brandschutz der TU Braunschweig durchgeführt. Die Proben konnten während der Belastung frei austrocknen (unversiegelte Versuche). Es wurden drei verschiedene Versuchsabläufe realisiert.

- I: "langsame" Aufheizung mit konstanter Aufheizgeschwindigkeit von rd. 5 K/h
- II: "schnelle" Aufheizung mit konstanter Aufheizgeschwindigkeit von rd. 20 K/h
- III: "stufenförmige" Aufheizung, wobei die Proben mit 5 K/h auf 120 °C aufgeheizt, dann ca. 24 h bei dieser Temperatur gehalten und anschließend mit 20 K/h auf 400, 500 bzw. 600 °C aufgeheizt wurden.

Die Proben wurden mit einer geringen Last in die Prüfmaschine eingebaut. Nach dem Einbau wurden die Proben bei Raumtemperatur zunächst dreimal mit maximal 15 N/mm² be- und entlastet, wobei der E-Modul bestimmt wurde. Anschließend wurde eine Kriechspannung von 15 N/mm² aufgebracht und es erfolgte die Aufheizung gemäß der zuvor genannten Temperaturprogramme auf 400 °C, 500 °C bzw. 600 °C. Nach dem Erreichen der entsprechenden Versuchstemperatur (400, 500 oder 600 °C) wurden die Proben bis zu 2 h thermisch homogenisiert. Dann wurde der E-Modul im heißen Zustand durch 3-maliges Be- und Entlasten bestimmt. Anschließend erfolgten dehnungsgesteuerte σ - ε -Versuche.

Ergänzend zu den auftragsgemäßen Versuchen wurden durch mechanisch unbelastete Aufheizung von jeweils einem Probekörper entsprechend dem Temperaturprogramm I und dem Temperaturprogramm III die thermischen Ausdehnungen von Rheinkiesbeton und Basaltbeton ermittelt.

Während des gesamten Versuchsablauf wurden die Verformungen und Temperaturen der Proben ständig registriert. So konnten auch die Betonverformungen während der Aufheizphase und Haltezeit für weitere Auswertungen herangezogen werden.

Unter Verwendung der Daten der thermischen Ausdehnung des Basaltbetons und des Rheinkiesbetons wurden die Verformungsdaten weiter ausgewertet. Insbesondere wurde das instationäre Kriechen während der Aufheizung bis 600 °C berechnet und analysiert.

Die erzielten Versuchsergebnisse lassen sich wie folgt zusammenfassen:

- Während der Aufheizung zeigen beide Betone nahezu identische auf die Kriechspannung bezogene instationäre Kriechverformungen. Sie sind sowohl beim Basaltbeton als auch beim Rheinkiesbeton bis etwa 40 °C sehr gering. Im anschließenden Temperaturbereich kann man sie bis etwa 400 °C in guter Näherung durch eine Gerade beschreiben. Oberhalb von 400 °C nimmt das instationäre Kriechen mit der weiteren Temperaturerhöhung progressiv zu. Im Temperaturbereich oberhalb 500 °C zeigt der Basaltbeton geringere instationäre Kriechverformungen als der Rheinkiesbeton. Bei 600 °C liegt das auf die Kriechspannung bezogene instationäre Kriechen von Basaltbeton bei ca. $-0,62 \cdot 10^{-3} \text{ mm}^2/\text{N}$ und beim Rheinkiesbeton bei ca. $-0,70 \cdot 10^{-3} \text{ mm}^2/\text{N}$.
- Sowohl beim Basaltbeton als auch beim Rheinkiesbeton ist nur eine sehr geringe Tendenz dahingehend vorhanden, daß die instationären Kriechverformungen bei langsam aufgeheizten Proben höher ausfallen als bei den schnell aufgeheizten Proben. Die Tendenz ist jedoch so gering, daß im Bereich der hier untersuchten Aufheizgeschwindigkeiten die Angabe einer einzigen mittleren Funktion für das instationäre Kriechen - für den jeweils betrachteten Beton - bis 600 °C gerechtfertigt erscheint.

- Bei den thermischen Ausdehnungen gibt es bis etwa 170 °C nur sehr geringe Unterschiede zwischen den beiden Betonen. Oberhalb von 170 °C dehnt sich der Rheinkiesbeton jedoch deutlich stärker aus als der Basaltbeton.
- Bei den stufenförmig aufgeheizten Proben zeigen sich nach Abschluß der Haltephase im Zuge der weiteren Aufheizung zunächst nur verschwindend geringe Kriechgeschwindigkeiten. Nach der Temperaturerhöhung von etwa 80 °C, d. h. etwa ab Temperaturen um 200 °C, mündet die Kurve für das instationäre Kriechen jedoch wieder in die Kurve ein, die bei kontinuierlicher Aufheizung von 20 °C beginnend erhalten worden ist.
- Die Festigkeit der belastet aufgeheizten Basaltbetonproben sinkt bei 400 °C auf etwa 58 % der mit thermisch unbelasteten Proben gemessenen Referenzfestigkeit; beim Rheinkiesbeton auf rd. 55 %. Bei 600 °C erreicht der Basaltbeton immerhin noch knapp 50 % der Referenzfestigkeit. Der Rheinkiesbeton weist hier noch knapp 40 % der Ausgangsfestigkeit auf. Unbelastete Proben zeigen bei 600 °C bedeutend geringere Festigkeiten (Basaltbeton etwa 25 %, Rheinkiesbeton etwa 24 %).
- Der E-Modul geht bei 400 °C, 500 °C und 600 °C in entsprechender Weise wie die Festigkeit zurück. Auch hier weisen die mechanisch unbelastet auf 600 °C aufgeheizten Proben bedeutend geringere E-Moduln auf als die mechanisch belasteten Proben.
- Der Basaltbeton und der Rheinkiesbeton verhalten sich sowohl hinsichtlich des Spannungs-Dehnungs-Verhaltens und auch hinsichtlich der Festigkeit und der Elastizität im Hochtemperaturbereich ähnlich. Etwaige Unterschiede sind nur sehr gering und i. w. auf die thermische Ausdehnung beschränkt.

Abschließend ist zu bemerken, daß zur Abrundung des Festigkeits- und Verformungsverhaltens bei hohen Temperaturen noch Anschlußversuche bei 200 °C und 300 °C durchgeführt werden sollten. Denn bisher wurden in diesem Temperaturbereich E-Modul- und Festigkeitswerte sowie Spannungs-Dehnungs-Linien nur nach Wiederabkühlung der Proben - als Restfestigkeiten bzw. Rest-E-Moduln - gemessen. Andererseits decken die bisher durchgeführten Biaxialversuche nur den Temperaturbereich bis 200 °C ab.

6. Schriftum

- /1/ Diederichs, U.: HTR-Betonversuche - Dauertemperaturversuche, Abschlußbericht zur Untersuchung im Auftrage der HRB GmbH, Mannheim. Institut für Baustoffe, Massivbau und Brandschutz der Technischen Universität Braunschweig, März 1986.
- /2/ Diederichs, U.: HTR-Betonversuche - Dauerstandsversuche, Abschlußbericht zur Untersuchung im Auftrage der HRB GmbH, Mannheim. Institut für Baustoffe, Massivbau und Brandschutz der Technischen Universität Braunschweig, April 1986.
- /3/ Diederichs, U.: HTR-Betonversuche - E-Modul-Versuche, Abschlußbericht zur Untersuchung im Auftrage der HRB GmbH, Mannheim. Institut für Baustoffe, Massivbau und Brandschutz der Technischen Universität Braunschweig, April 1986.
- /4/ Diederichs, U.: HTR-Betonversuche - Hochtemperaturkriechversuche, Abschlußbericht zur Untersuchung im Auftrage der HRB GmbH, Mannheim. Institut für Baustoffe, Massivbau und Brandschutz der Technischen Universität Braunschweig, Juni 1986.
- /5/ Diederichs, U.; Ehm, C.: HTR-Betonversuche - Biaxiale Druckversuche, Abschlußbericht zur Untersuchung im Auftrage der HRB GmbH, Mannheim. Institut für Baustoffe, Massivbau und Brandschutz der Technischen Universität Braunschweig, Juni 1986.
- /6/ Wydra, W.; Diederichs, U.; Schneider, U.: Deformation Behaviour and Creep Effects during a Heating-Cooling-Cycle. Proceedings of the 8th International Conference on "Structural Mechanics in Reactor Technology", Brussels (Belgium), 19. - 23. August 1985, Volume H, Paper H 5/6.
- /7/ Diederichs, U.; Ehm, C.; Hinrichsmeyer, K.; Schneider, U.; Wydra, W.: Hochtemperaturverhalten von Festbeton. Arbeitsbericht 1984 - 1986 des Sonderforschungsbereichs 148 "Brandverhalten von Bauteilen", Teil II, Technische Universität Braunschweig, Juli 1987.

- /8/ Schneider, U.; Diederichs, U.; Hinrichsmeyer, K.: Hochtemperaturverhalten von Beton. Arbeitsbericht 1981 - 1983 des Sonderforschungsbereichs 148 "Brandverhalten von Bauteilen", Teil II, Technische Universität Braunschweig, Mai 1983.
- /9/ Hinrichsmeyer, K.: Strukturorientierte Analyse und Modellbeschreibung der thermischen Schädigung von Beton. Dissertation, Technische Universität Braunschweig, 1986.

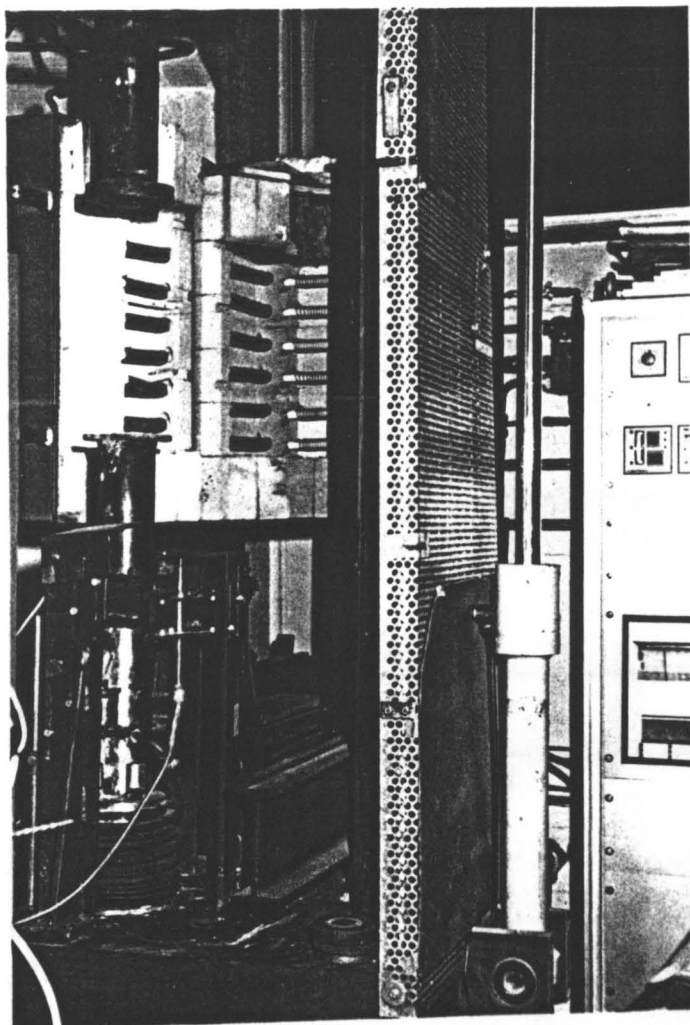


Bild 1: Übersichtsfoto einer Hochtemperatur-Prüfmaschine

Bild 2: Schematische Darstellung des Versuchsaufbaus

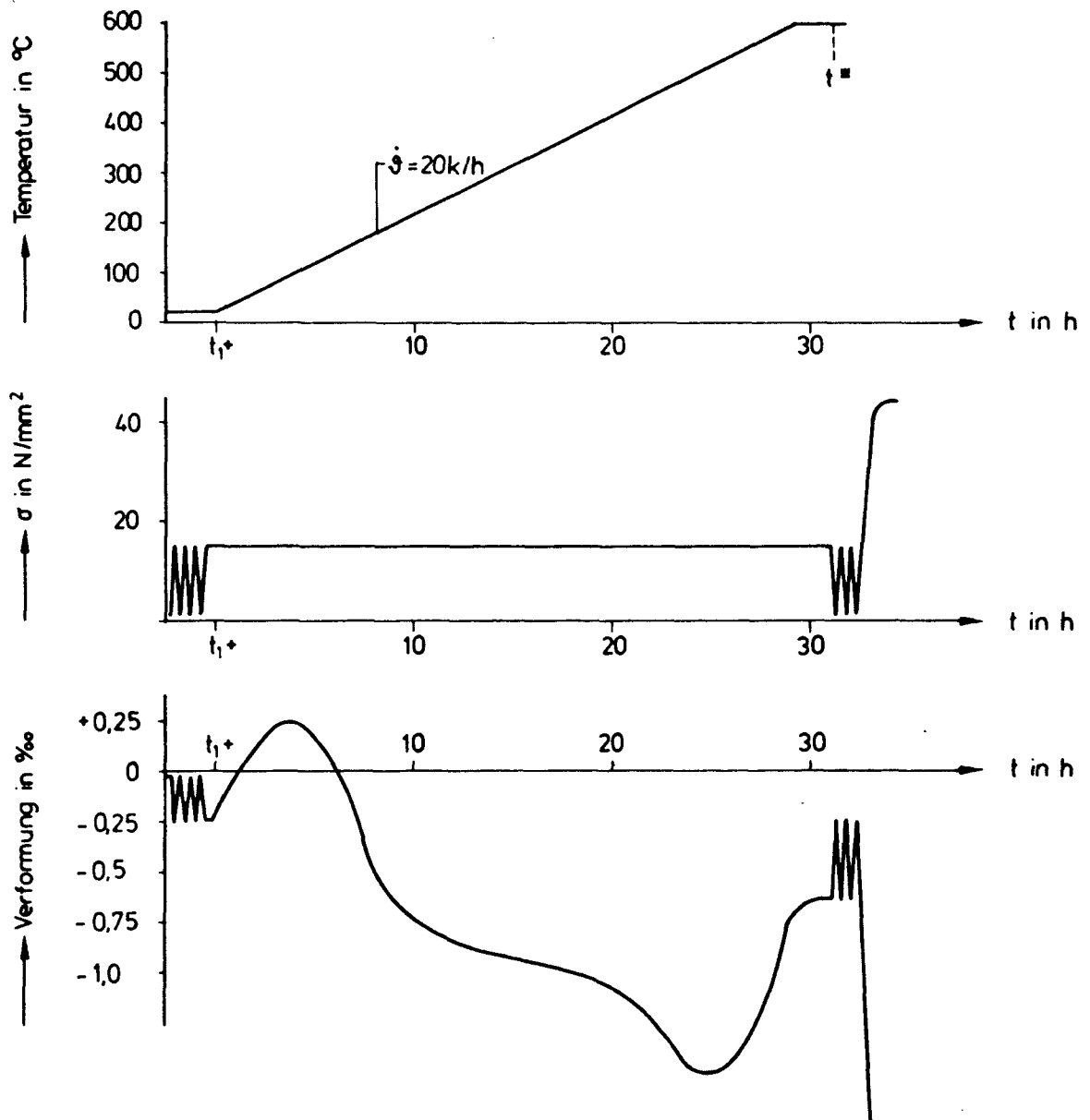


Bild 2: Schematische Darstellung des Versuchsablaufs

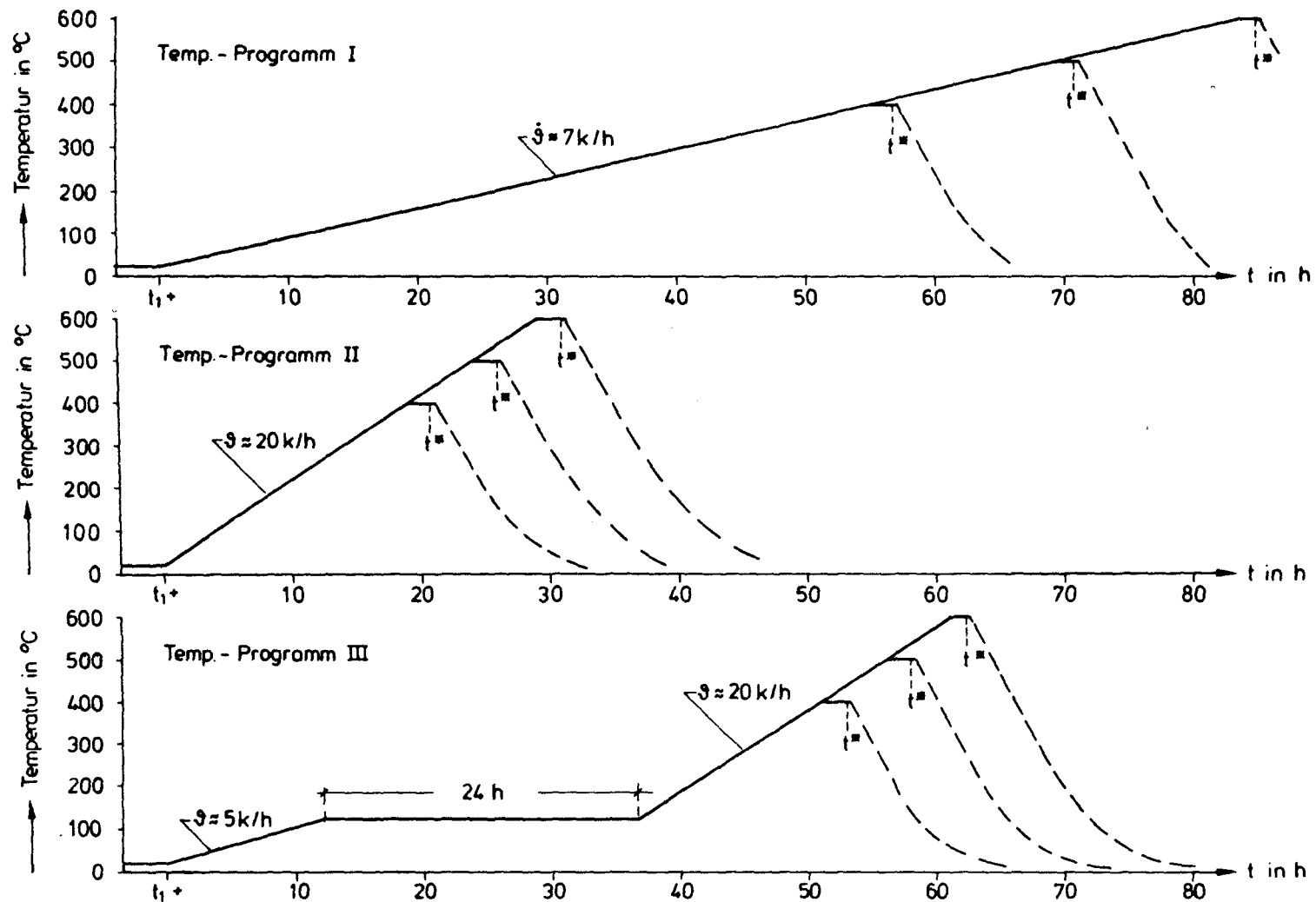


Bild 3: Schematische Darstellung der unterschiedlichen Temperaturprogramme

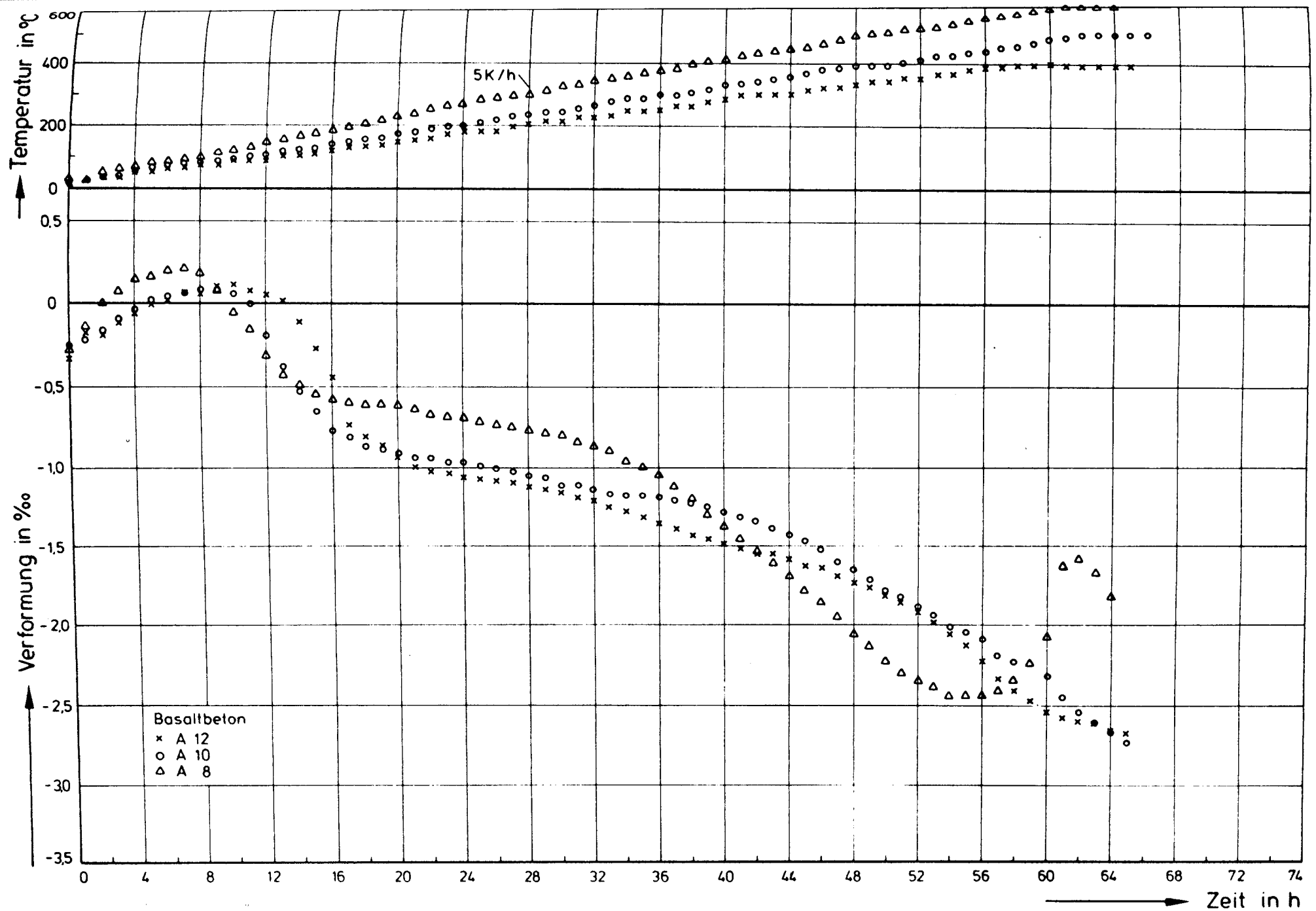


Bild 4: Gesamtverformung von Basaltbeton bei Belastung nach dem Temperaturprogramm I (langsame Aufheizung)

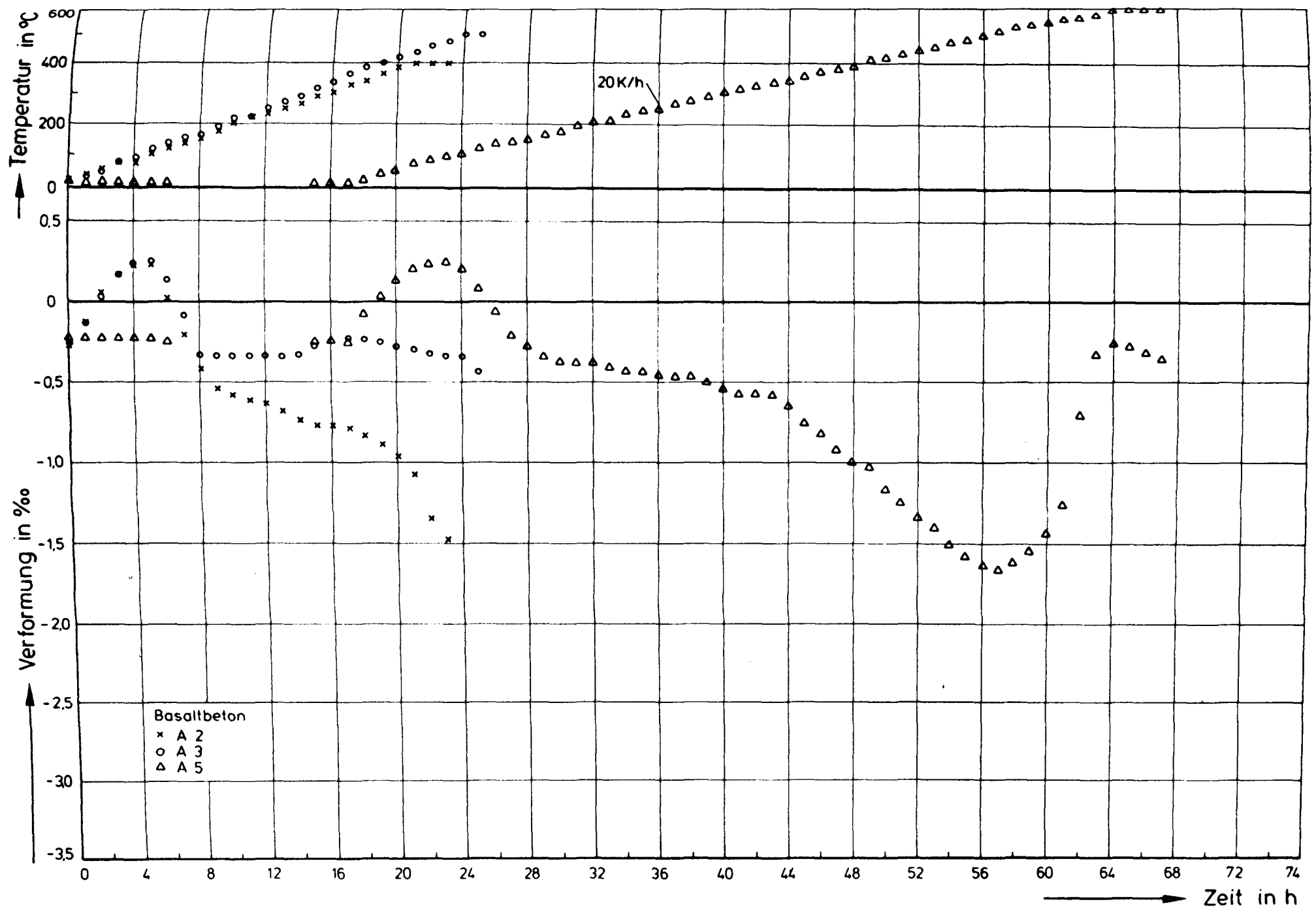


Bild 5: Gesamtverformung von Basaltbeton bei Belastung nach dem Temperaturprogramm II (schnelle Aufheizung)

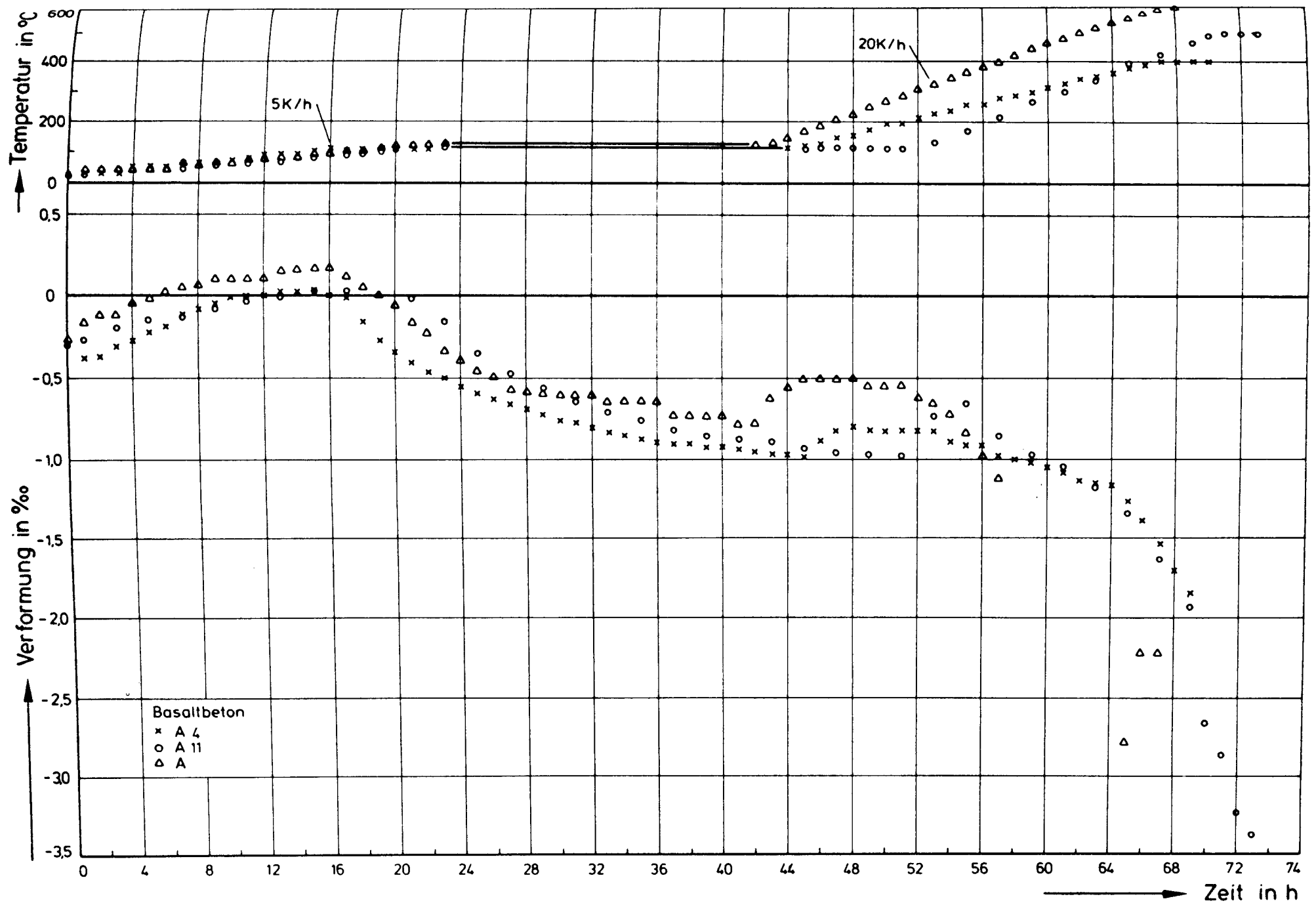


Bild 6: Gesamtverformung von Basaltbeton bei Belastung nach dem Temperaturprogramm III (stufenförmige Aufheizung)

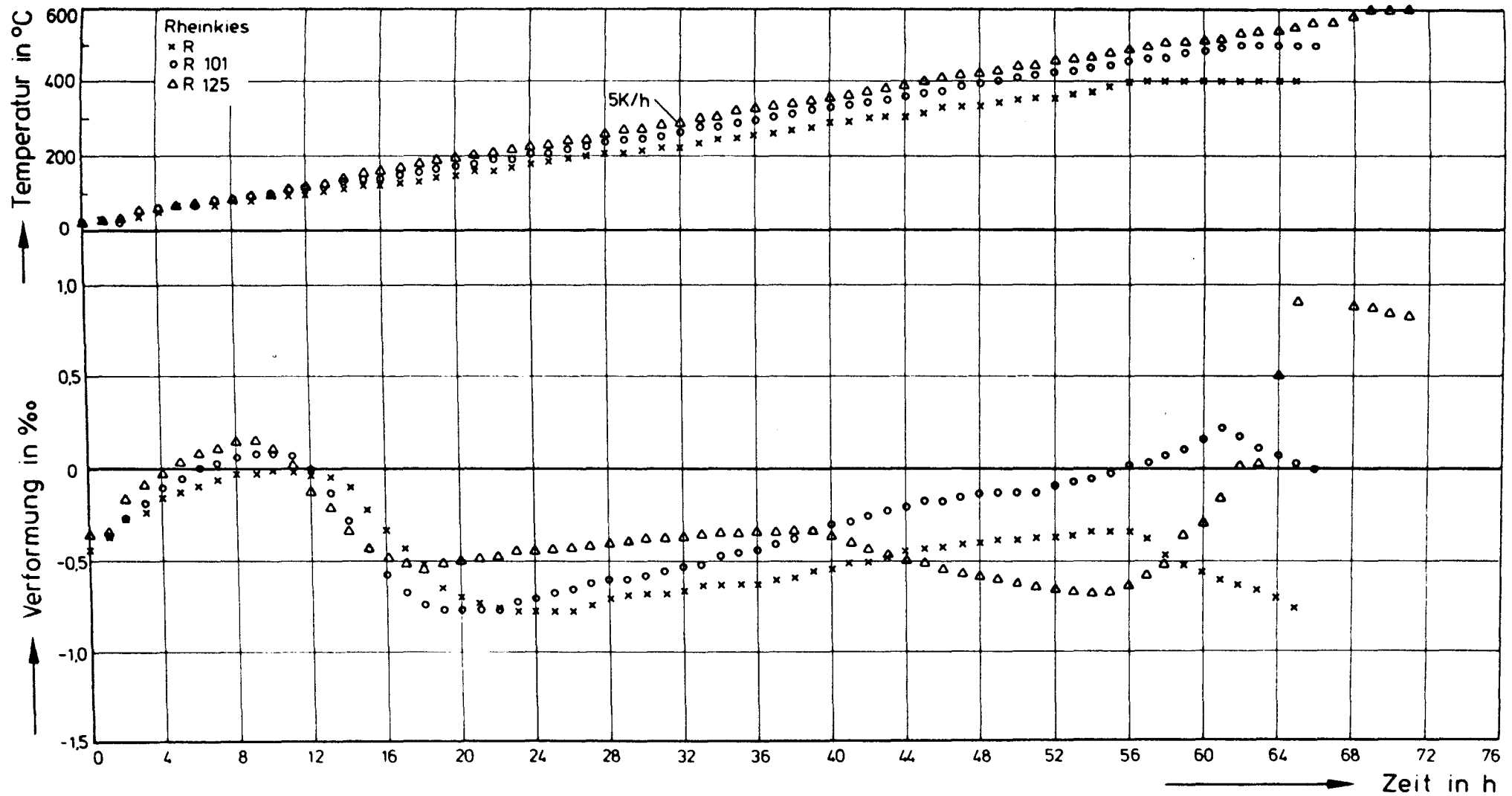


Bild 7: Temperaturverlauf und Gesamtverformung von Rheinkiesbeton bei Belastung nach dem Temperaturprogramm I (langsame Aufheizung)

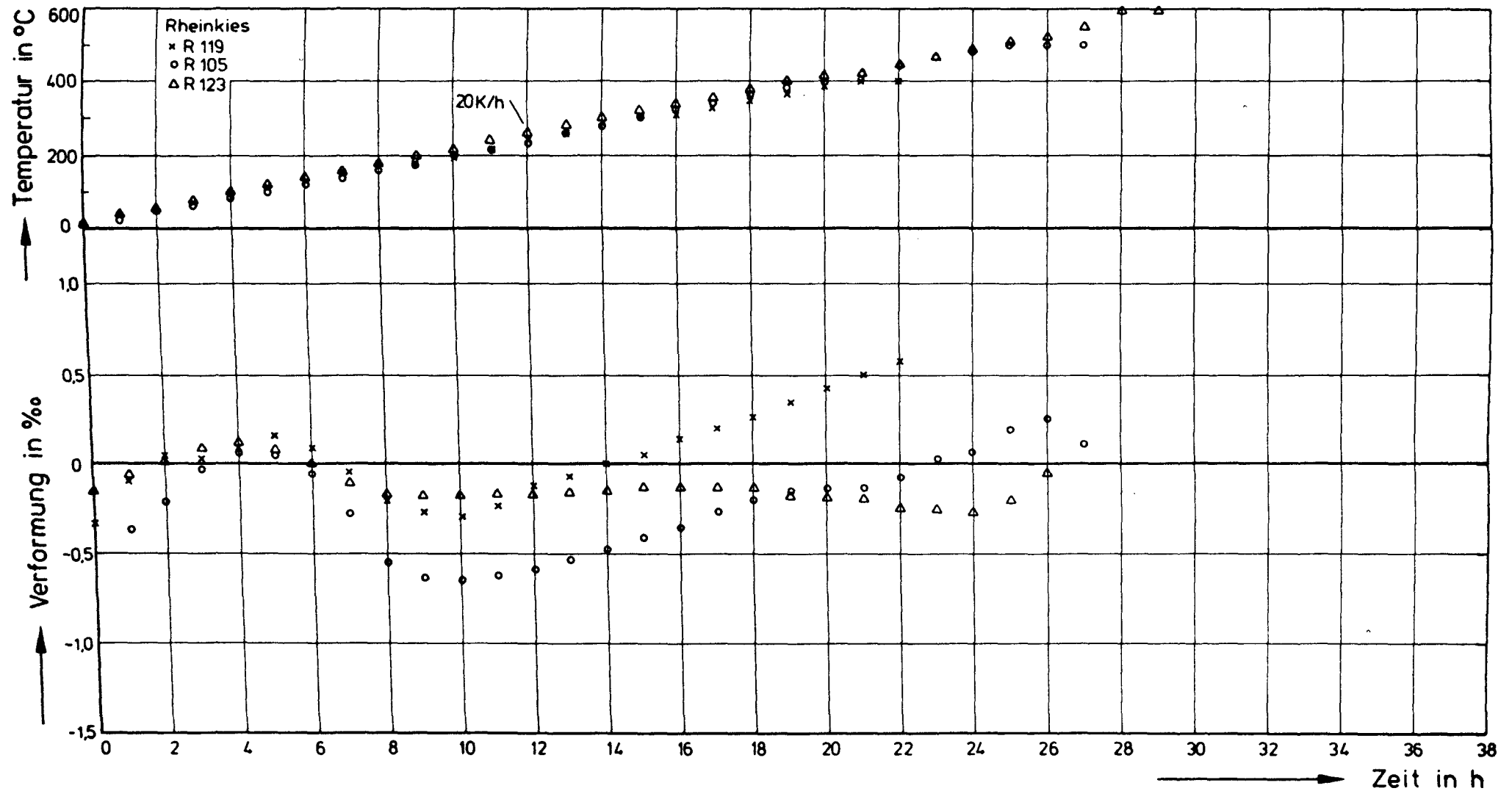


Bild 8: Temperaturverlauf und Gesamtverformung von Rheinkiesbeton bei Belastung nach dem Temperaturprogramm II (schnelle Aufheizung)

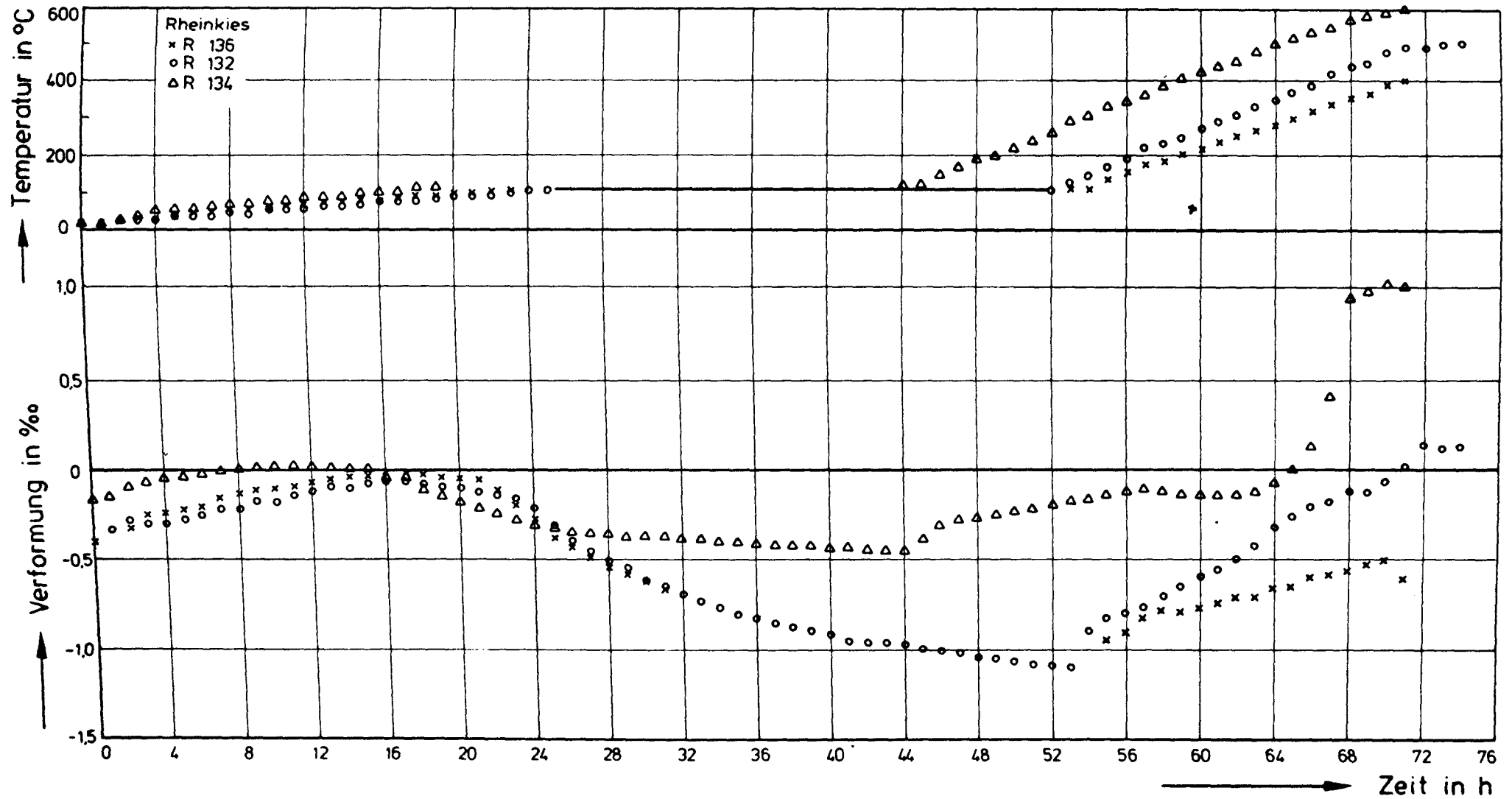


Bild 9: Temperaturverlauf und Gesamtverformung von Rheinkiesbeton bei Belastung nach dem Temperaturprogramm III (stufenförmige Aufheizung)

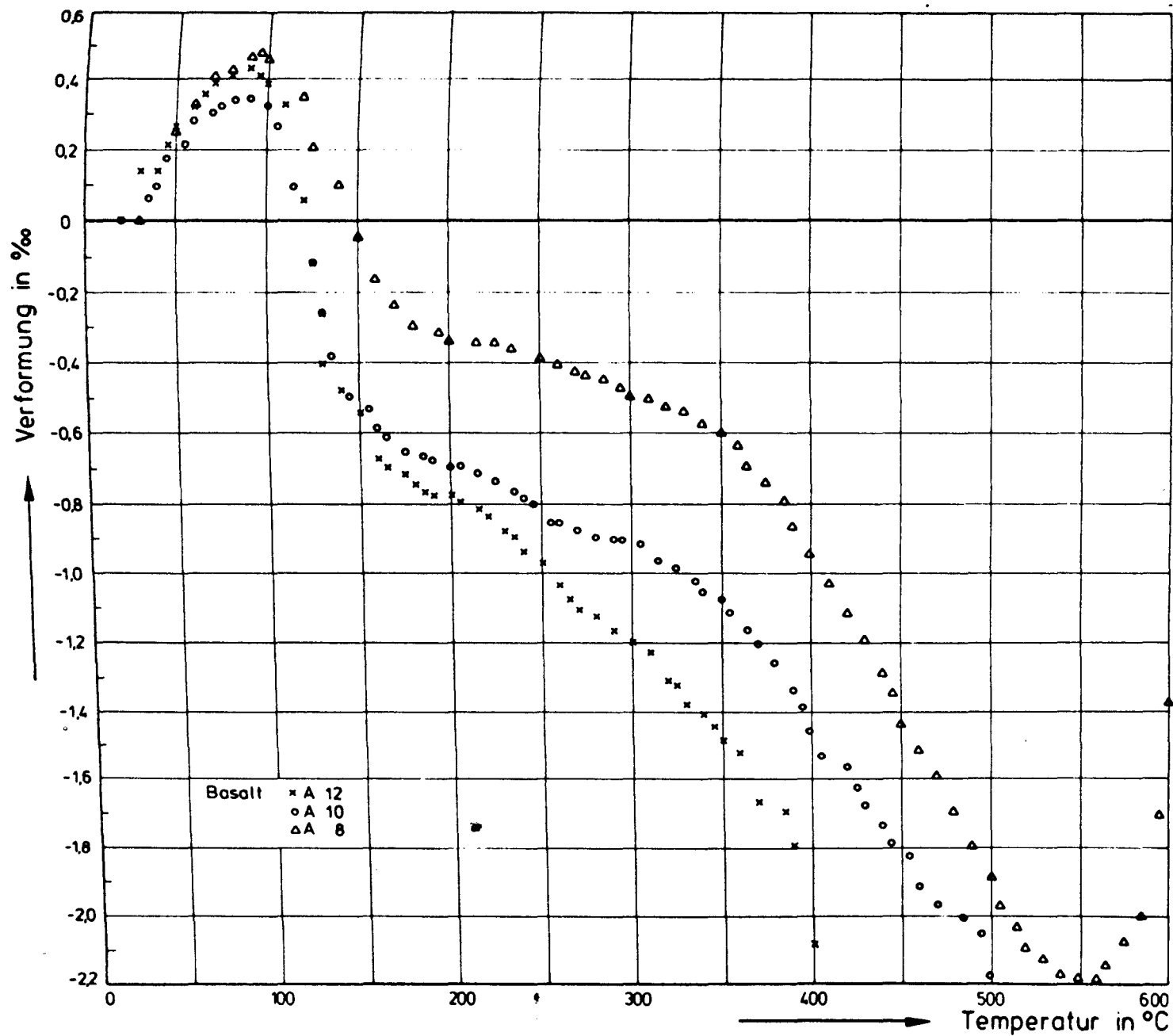


Bild 10: Summe aus thermischer Ausdehnung und instationärer Kriechverformung von Basaltbeton während der Aufheizung nach dem Temperaturprogramm I

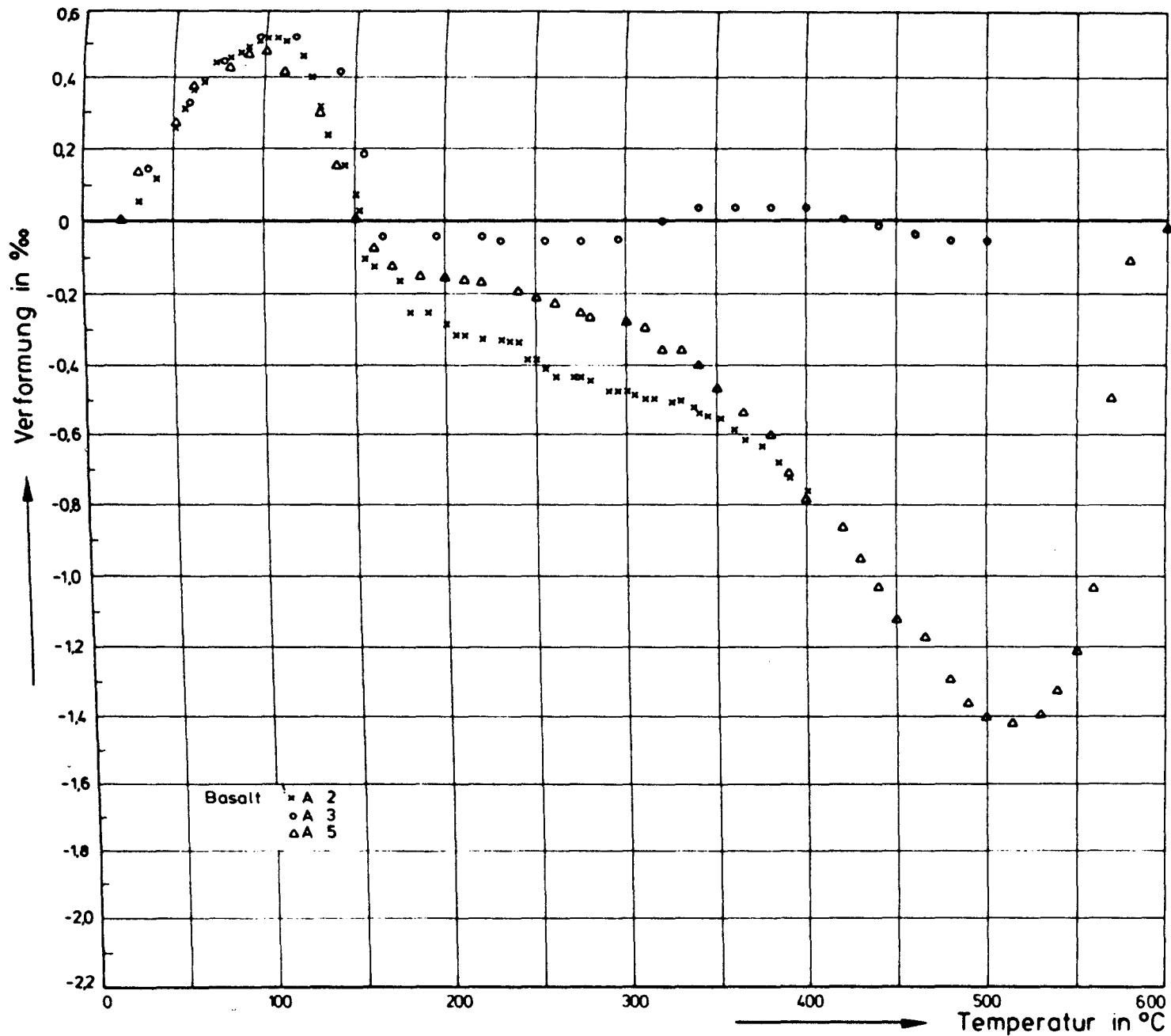


Bild 11: Summe aus thermischer Ausdehnung und instationärer Kriechverformung von Basaltbeton während der Aufheizung nach dem Temperaturprogramm II

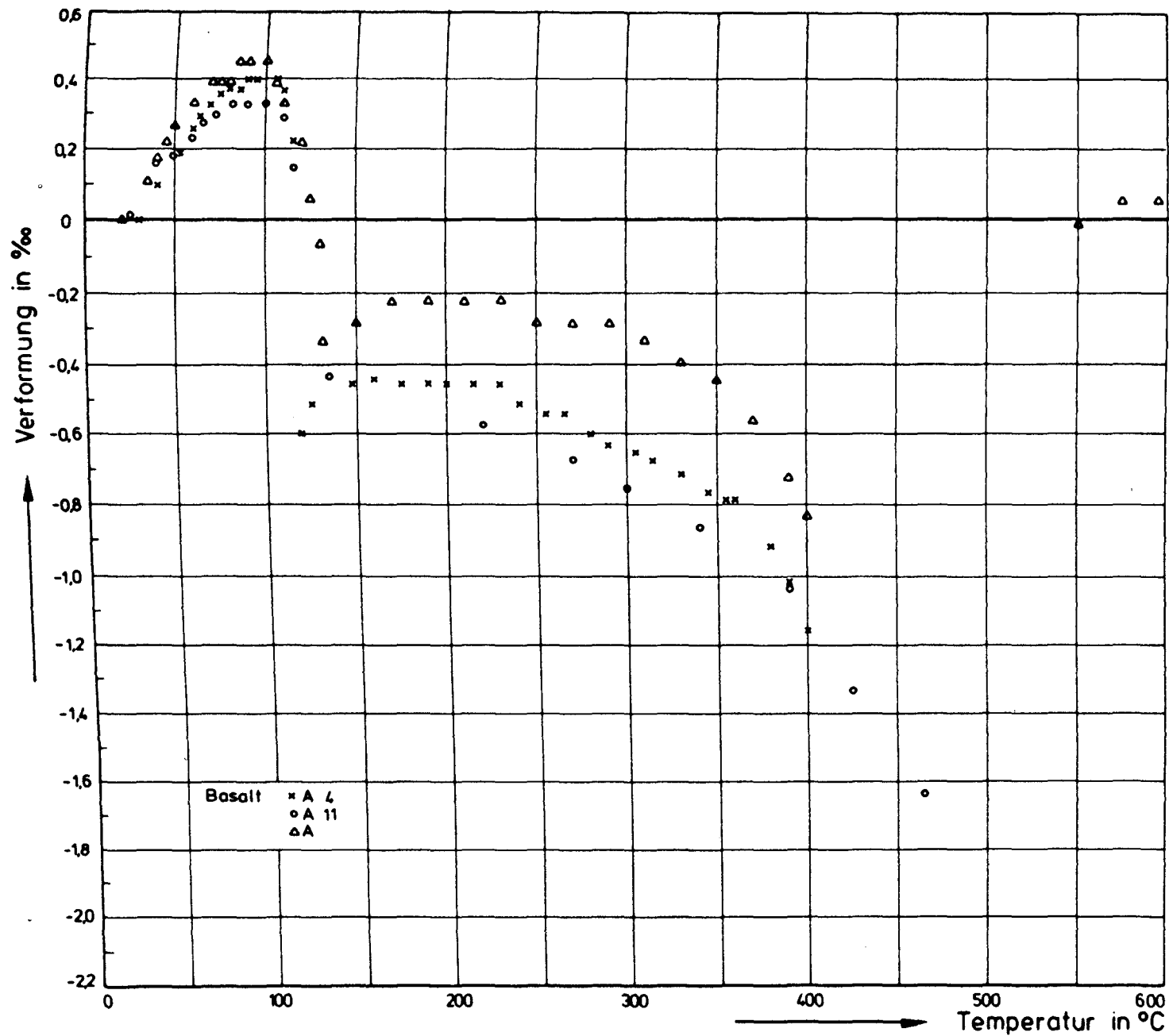


Bild 12: Summe aus thermischer Ausdehnung und instationärer Kriechverformung von Basaltbeton während der Aufheizung nach dem Temperaturprogramm III

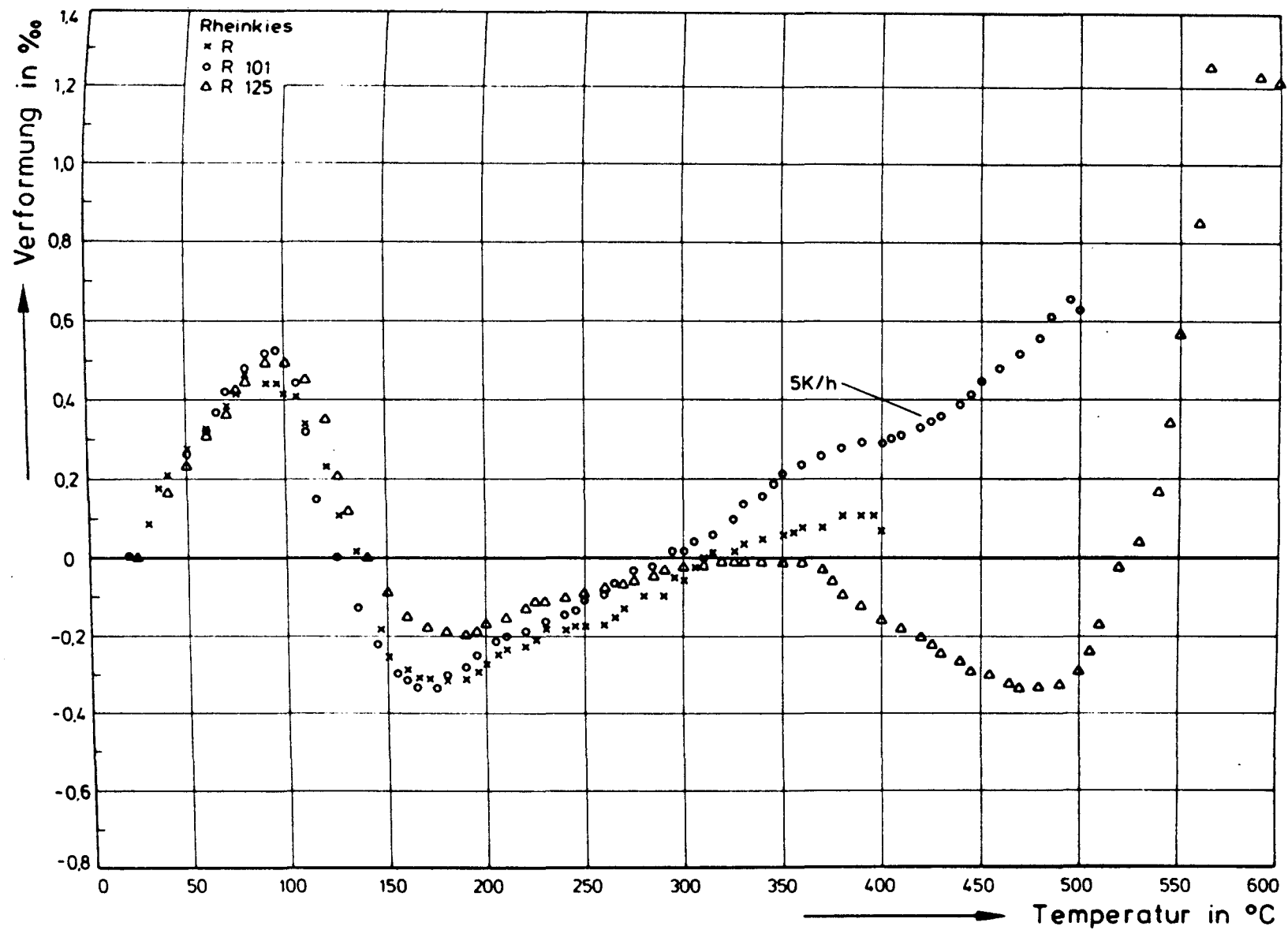


Bild 13: Summe aus thermischer Ausdehnung und instationärer Kriechverformung von Rheinkiesbeton während der Aufheizung nach dem Temperaturprogramm I

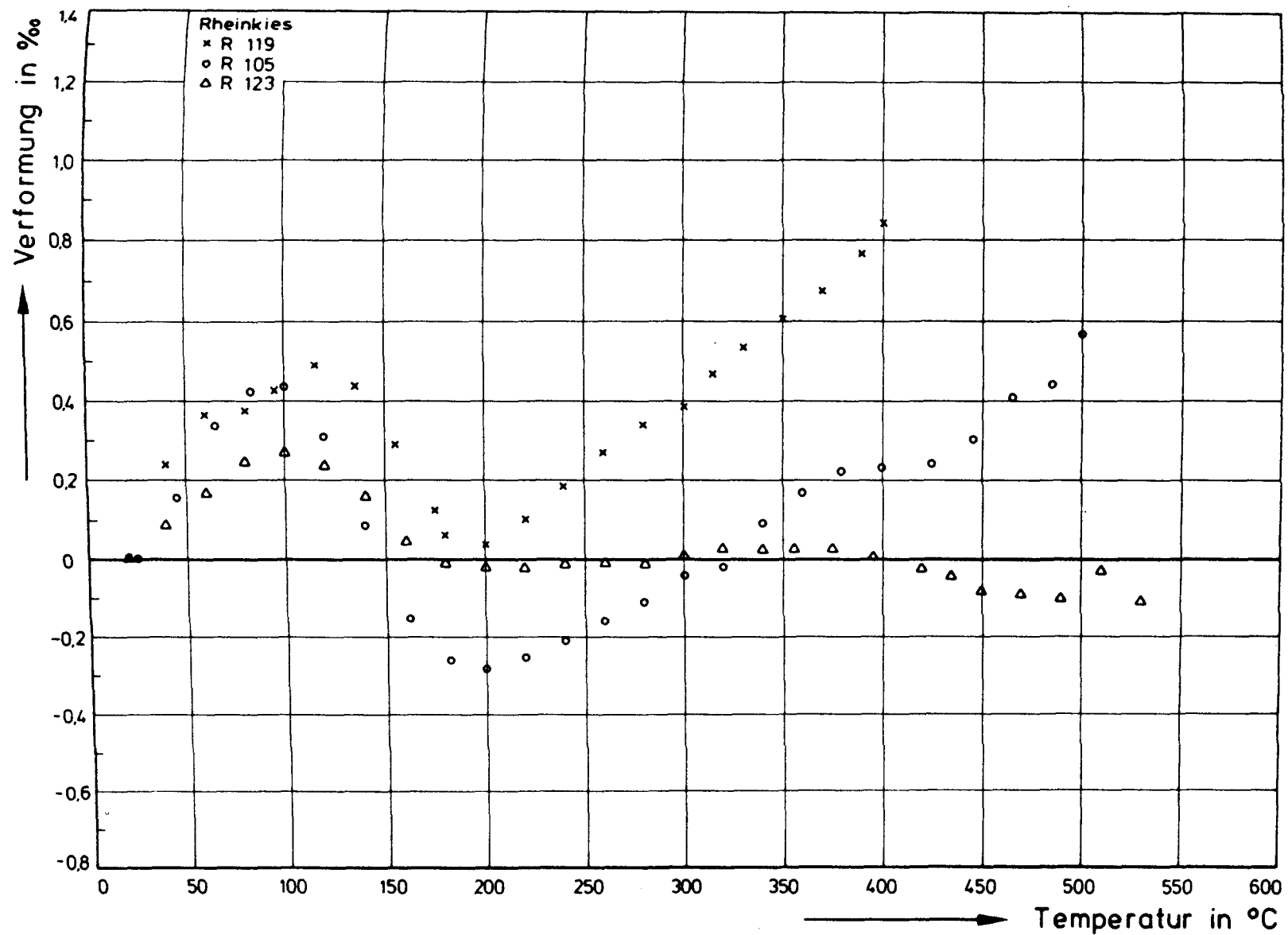


Bild 14: Summe aus thermischer Ausdehnung und instationärer Kriechverformung von Rheinkiesbeton während der Aufheizung nach dem Temperaturprogramm II

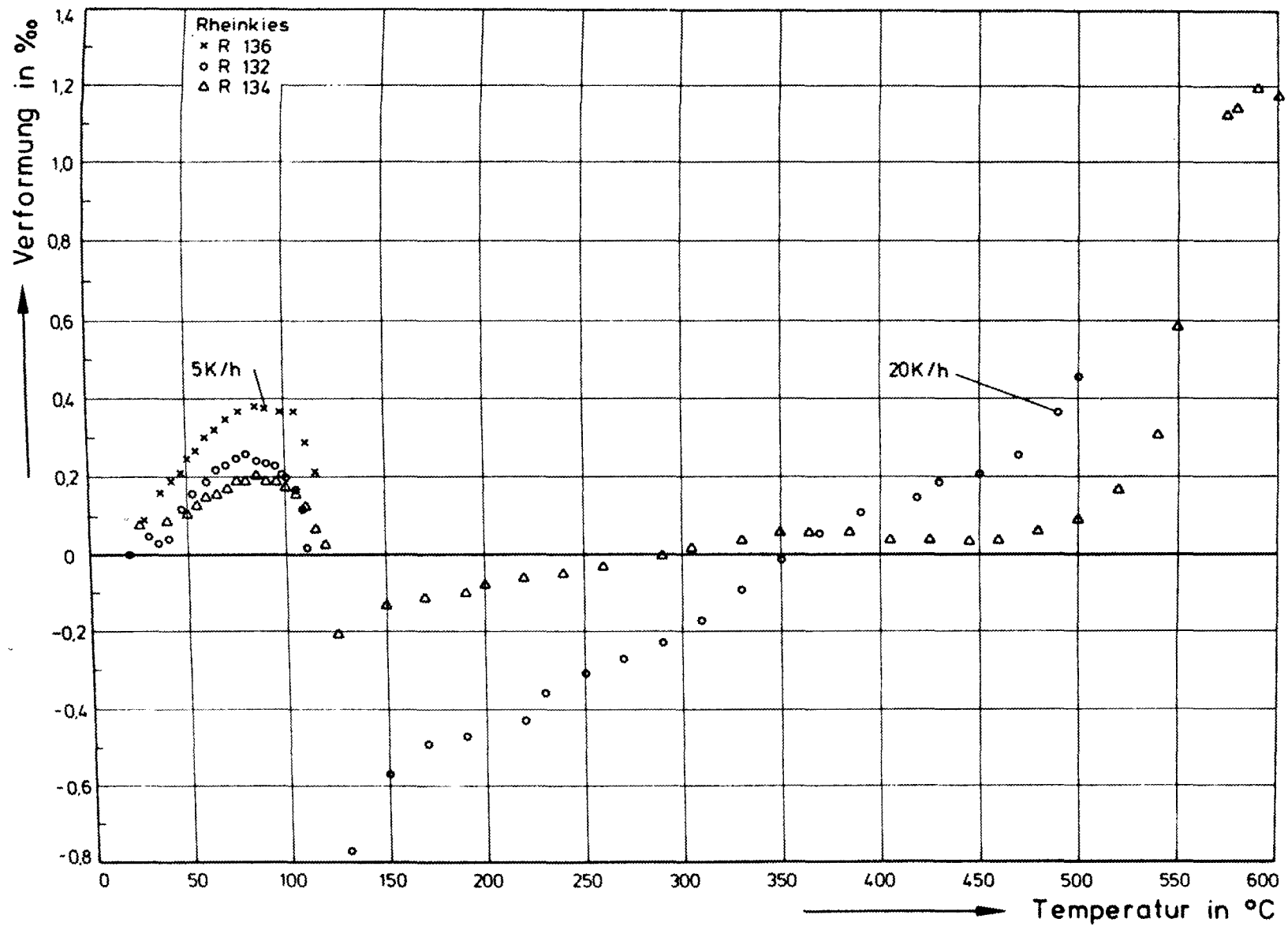


Bild 15: Summe aus thermischer Ausdehnung und instationärer Kriechverformung von Rheinkiesbeton während der Aufheizung nach dem Temperaturprogramm III

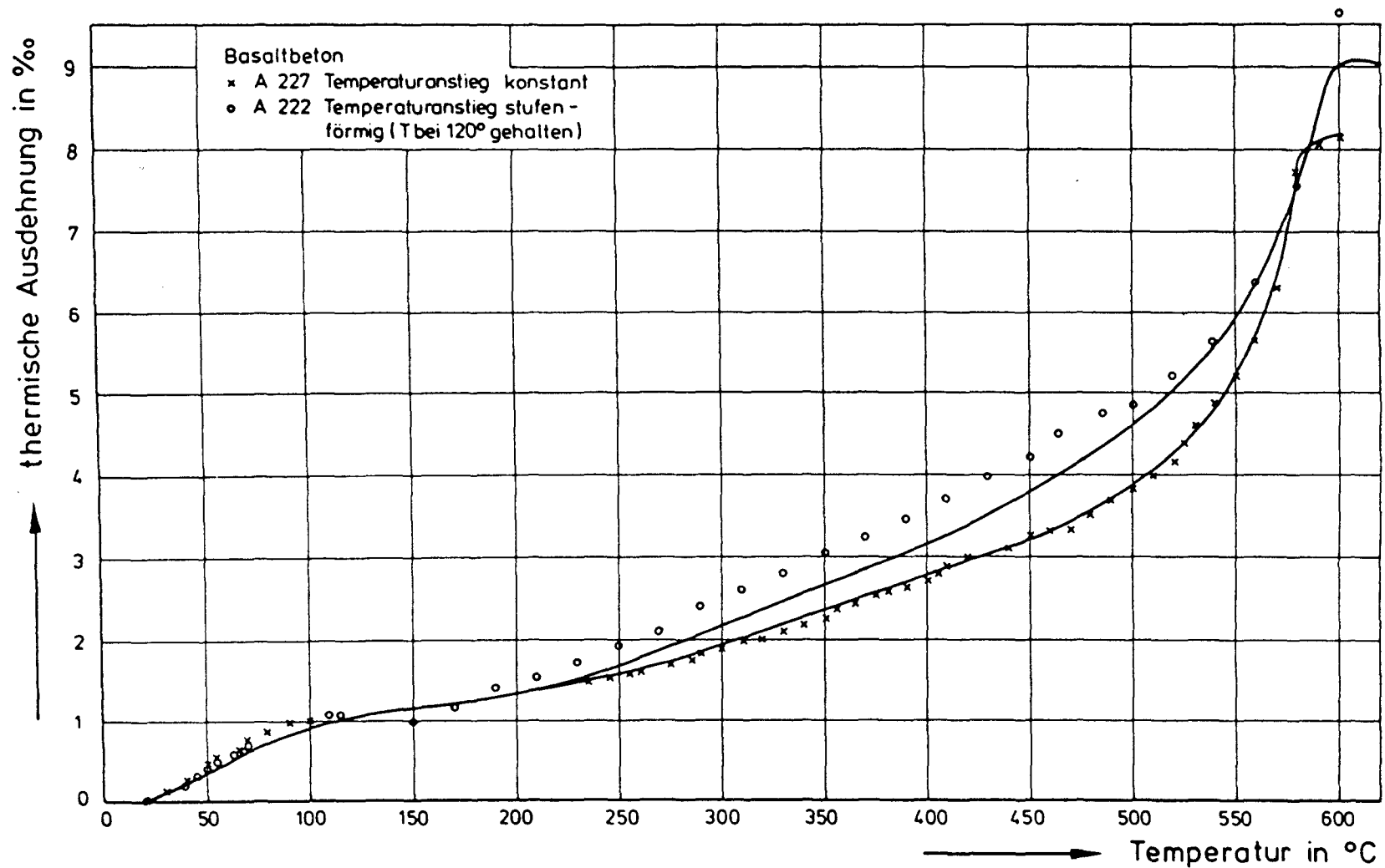


Bild 16: Thermische Ausdehnung von Basaltbeton bei unterschiedlicher Aufheizung

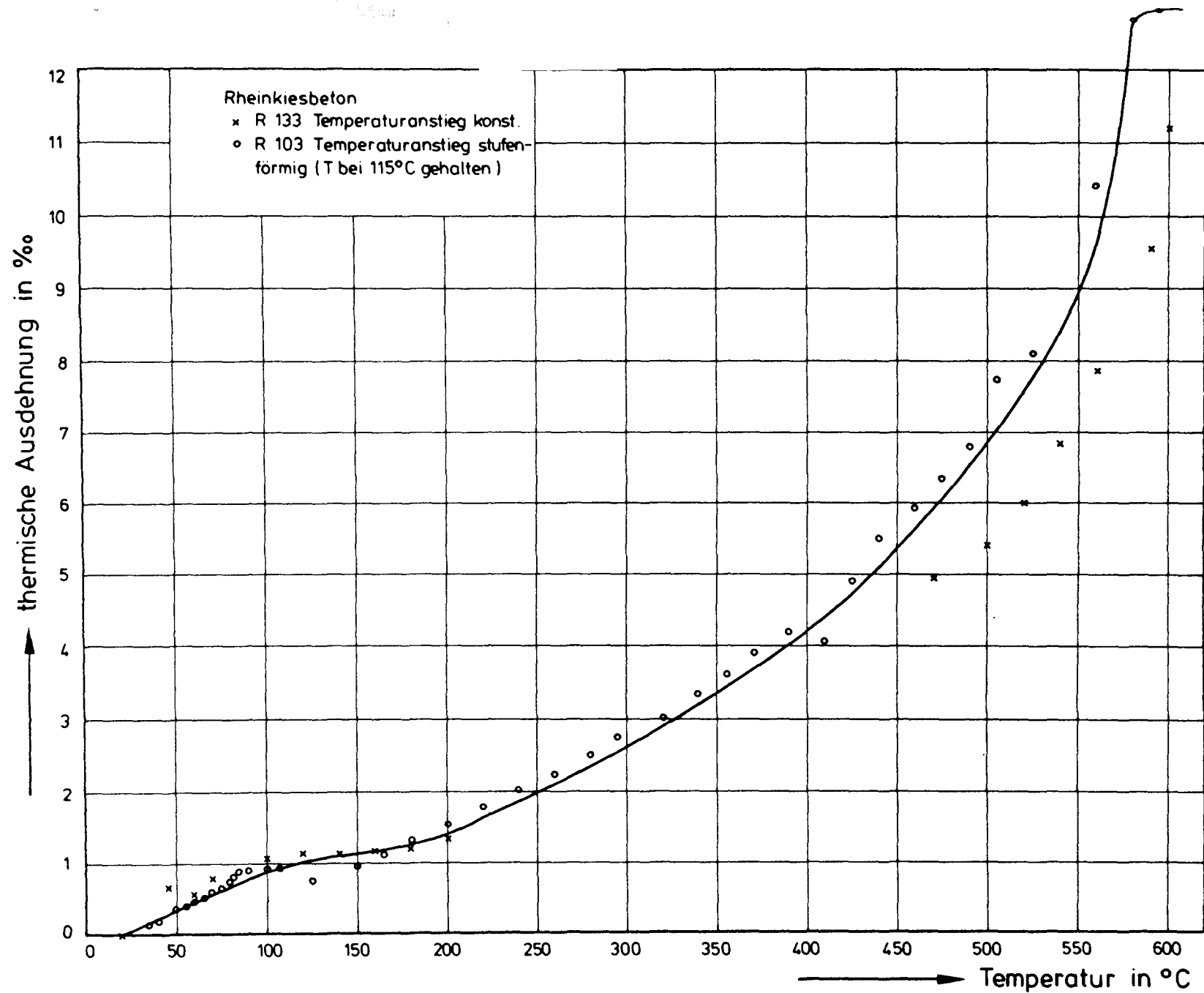


Bild 17: Thermische Ausdehnung von Rheinkiesbeton bei unterschiedlicher Aufheizung

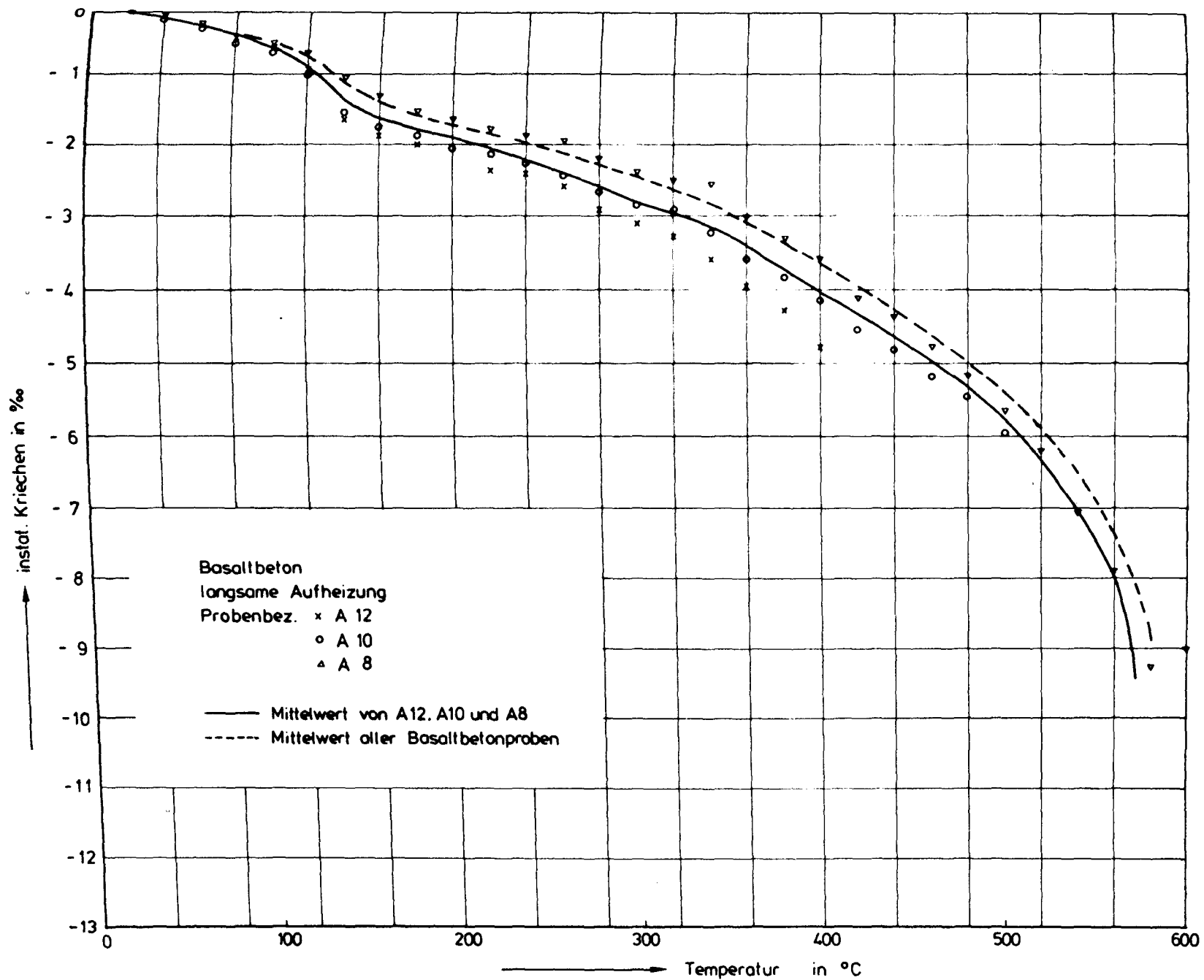


Bild 18: Instationäres Kriechen von langsam aufgeheiztem Basaltbeton

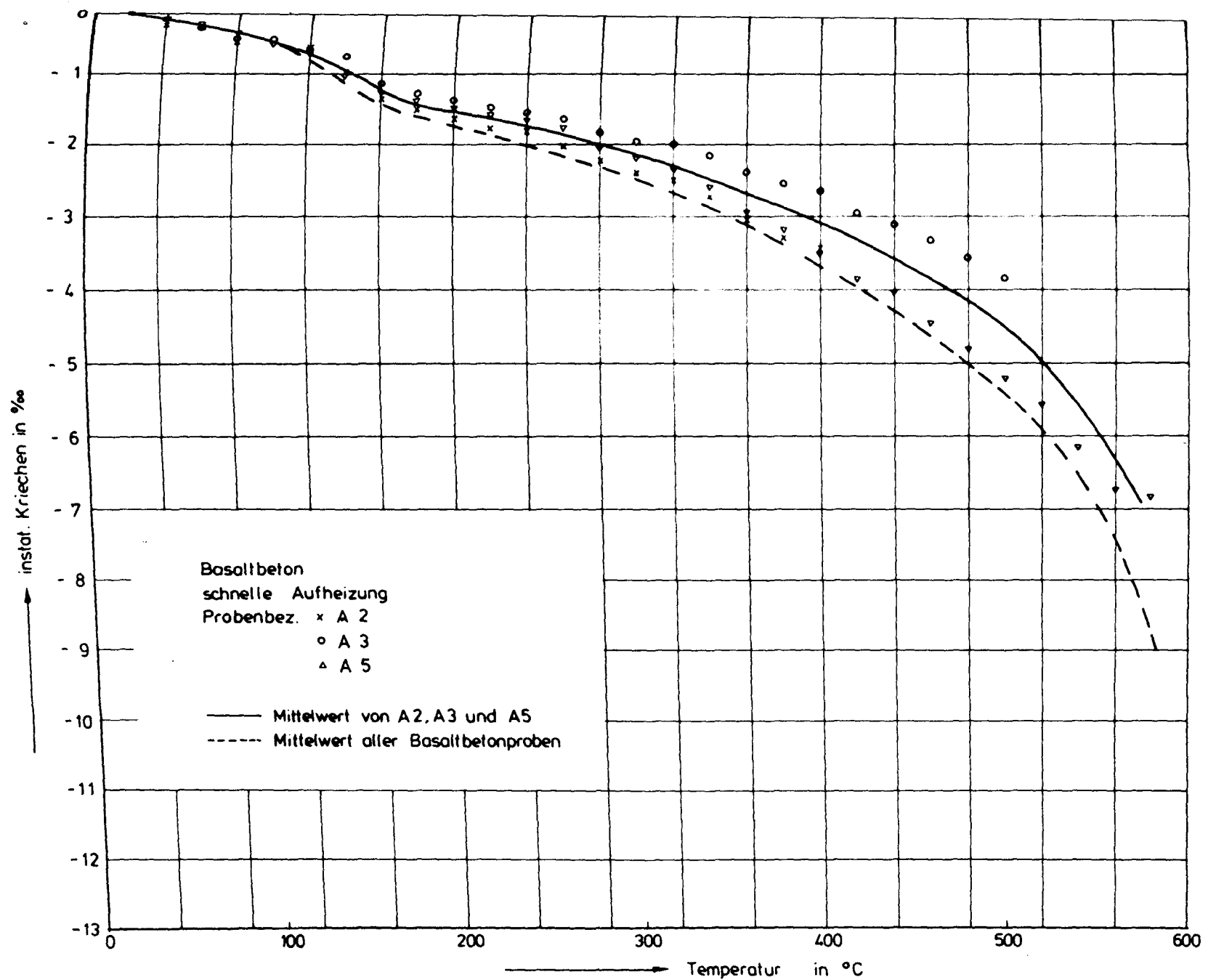


Bild 19: Instationäres Kriechen von schnell aufgeheiztem Basaltbeton

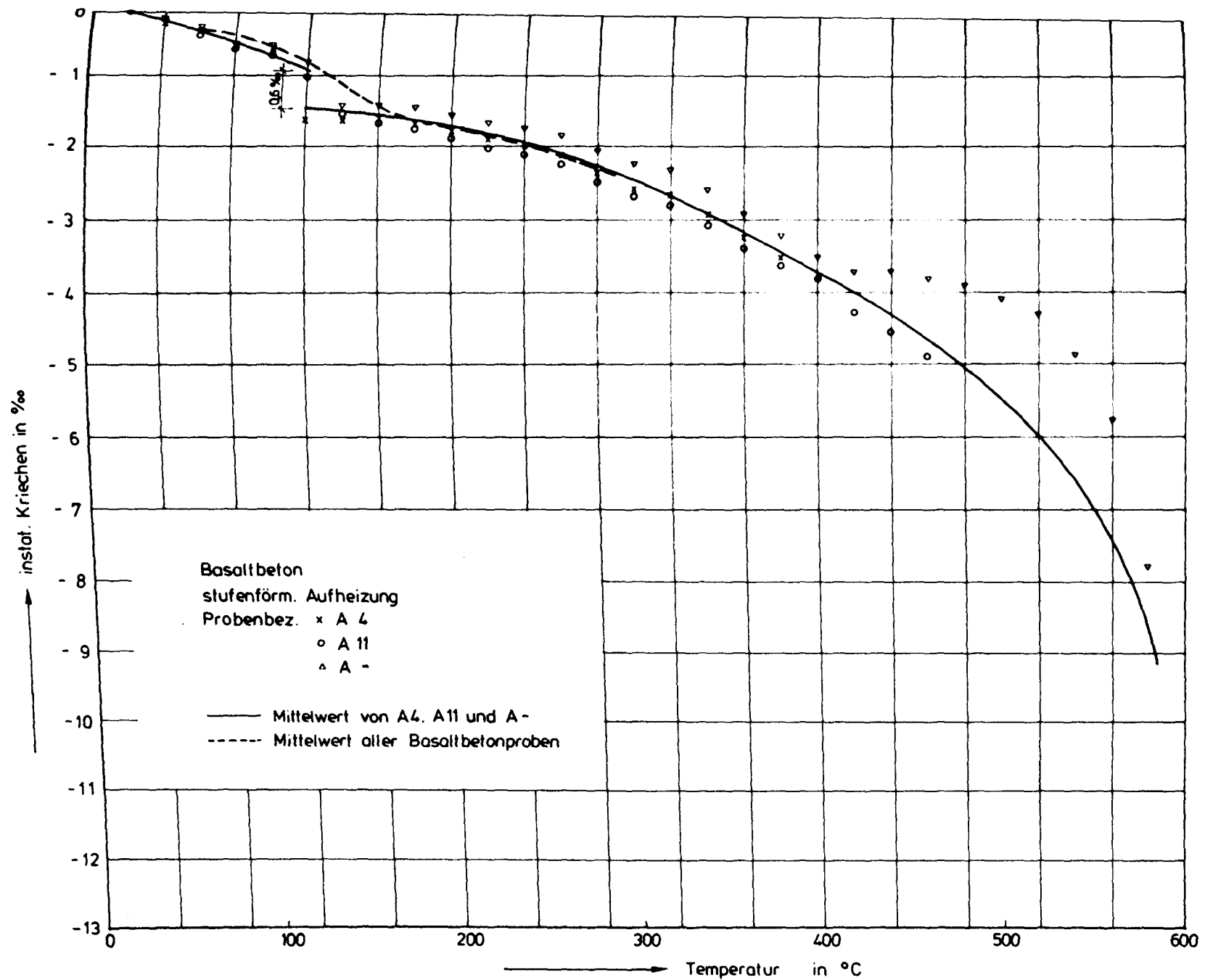


Bild 20: Instationäres Kriechen von stufenförmig aufgeheiztem Basaltbeton

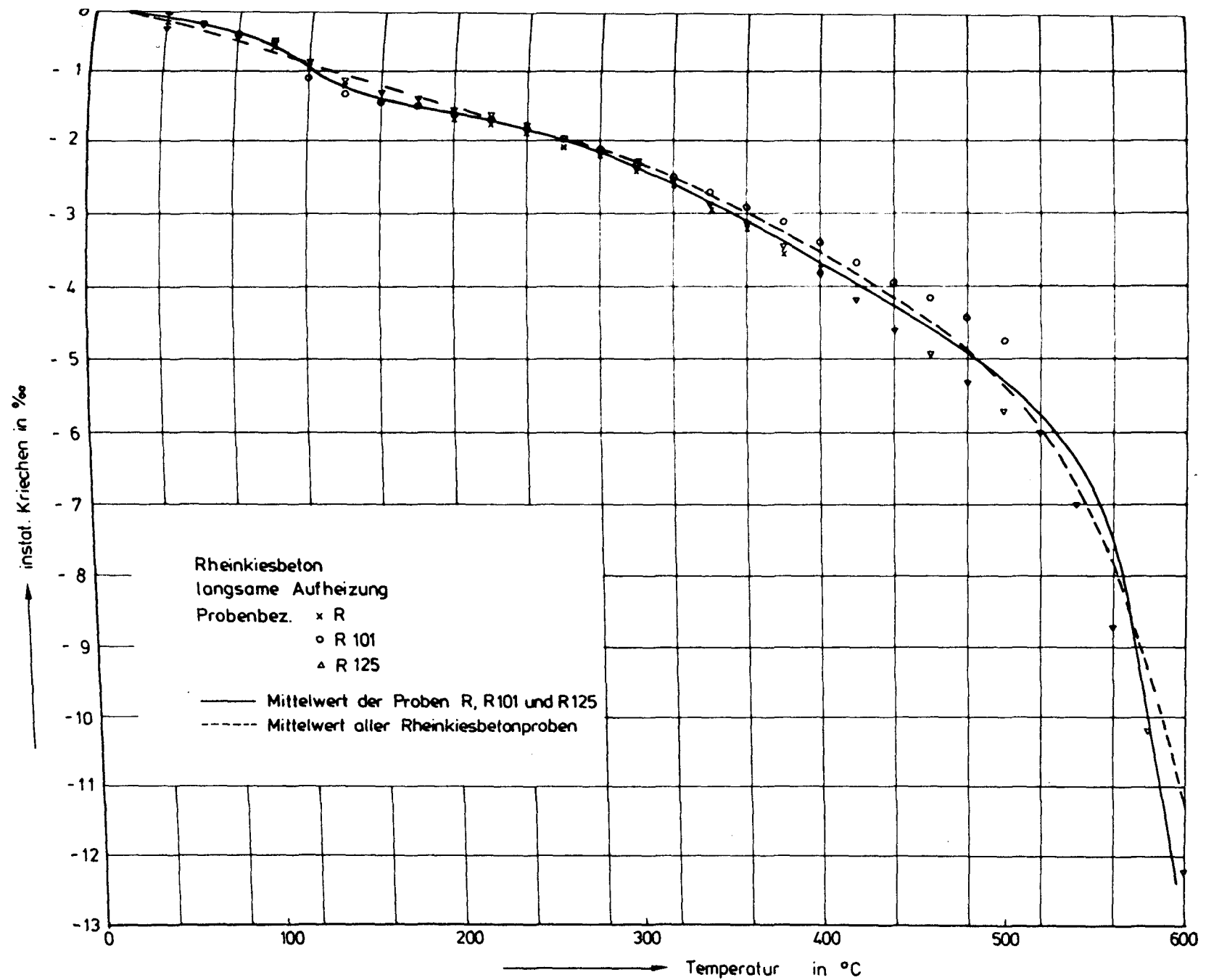


Bild 21: Instationäres Kriechen von langsam aufgeheiztem Rheinkiesbeton

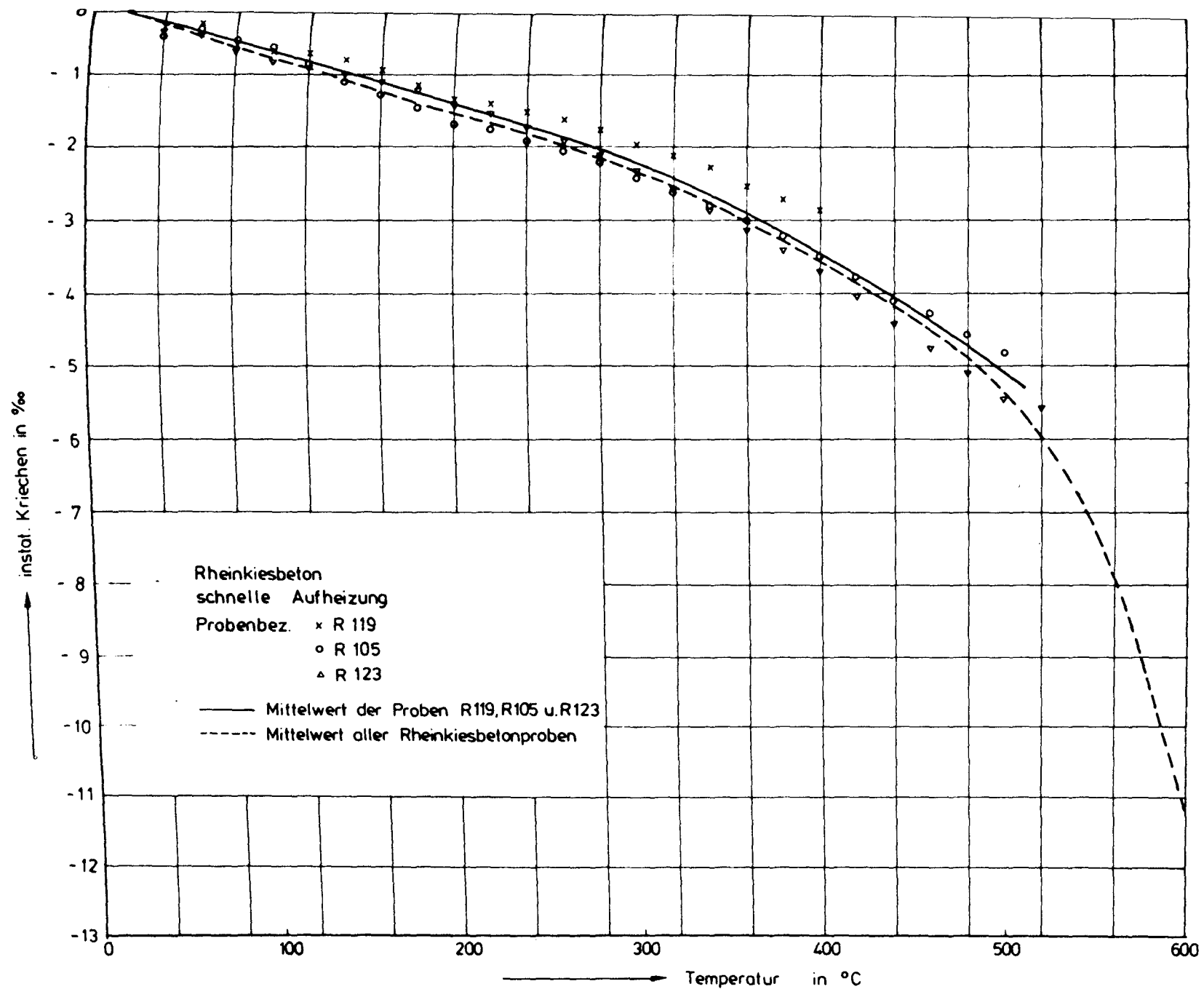


Bild 22: Instationäres Kriechen von schnell aufgeheiztem Rheinkiesbeton

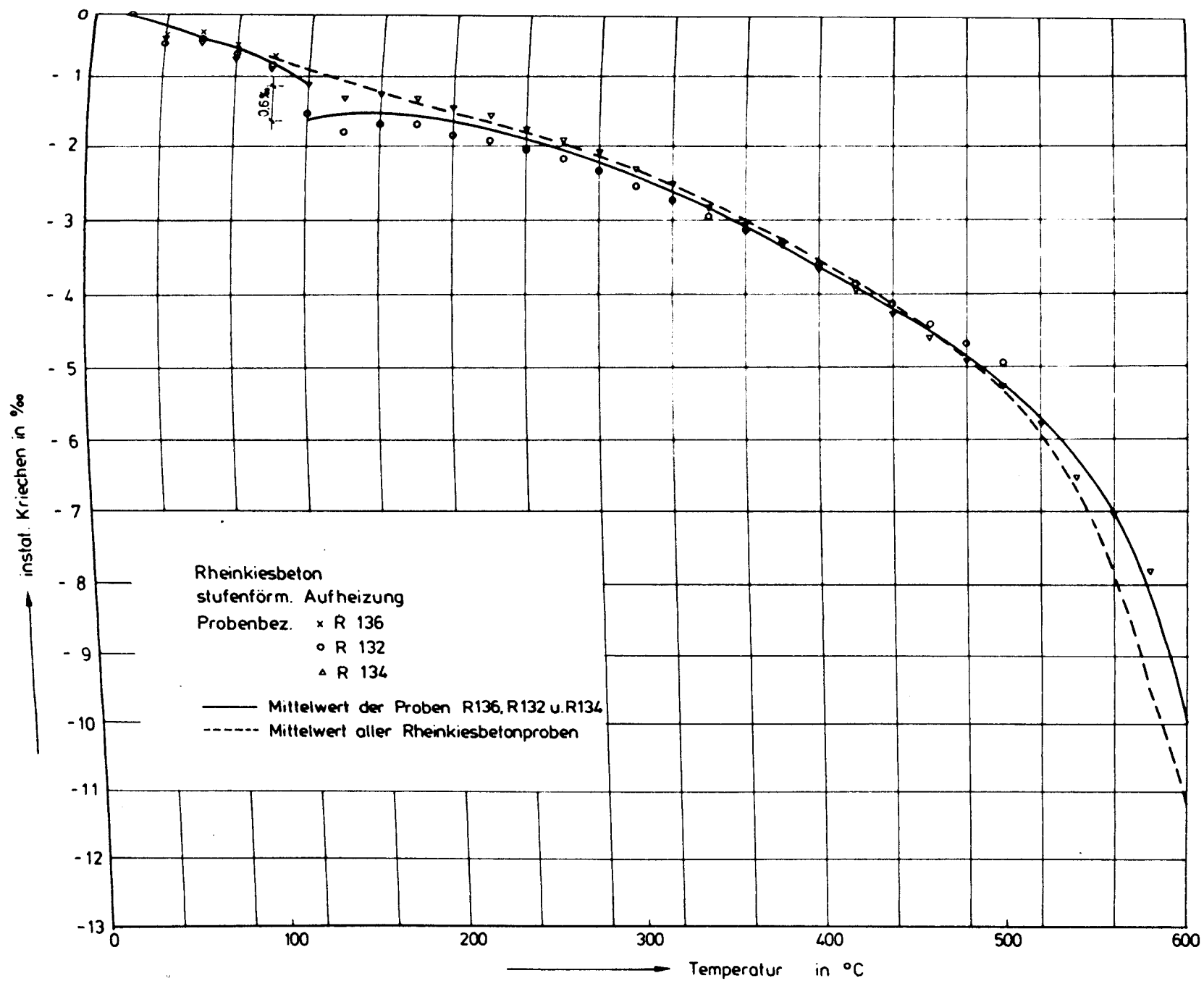


Bild 23: Instationäres Kriechen von stufenförmig aufgeheiztem Rheinkiesbeton

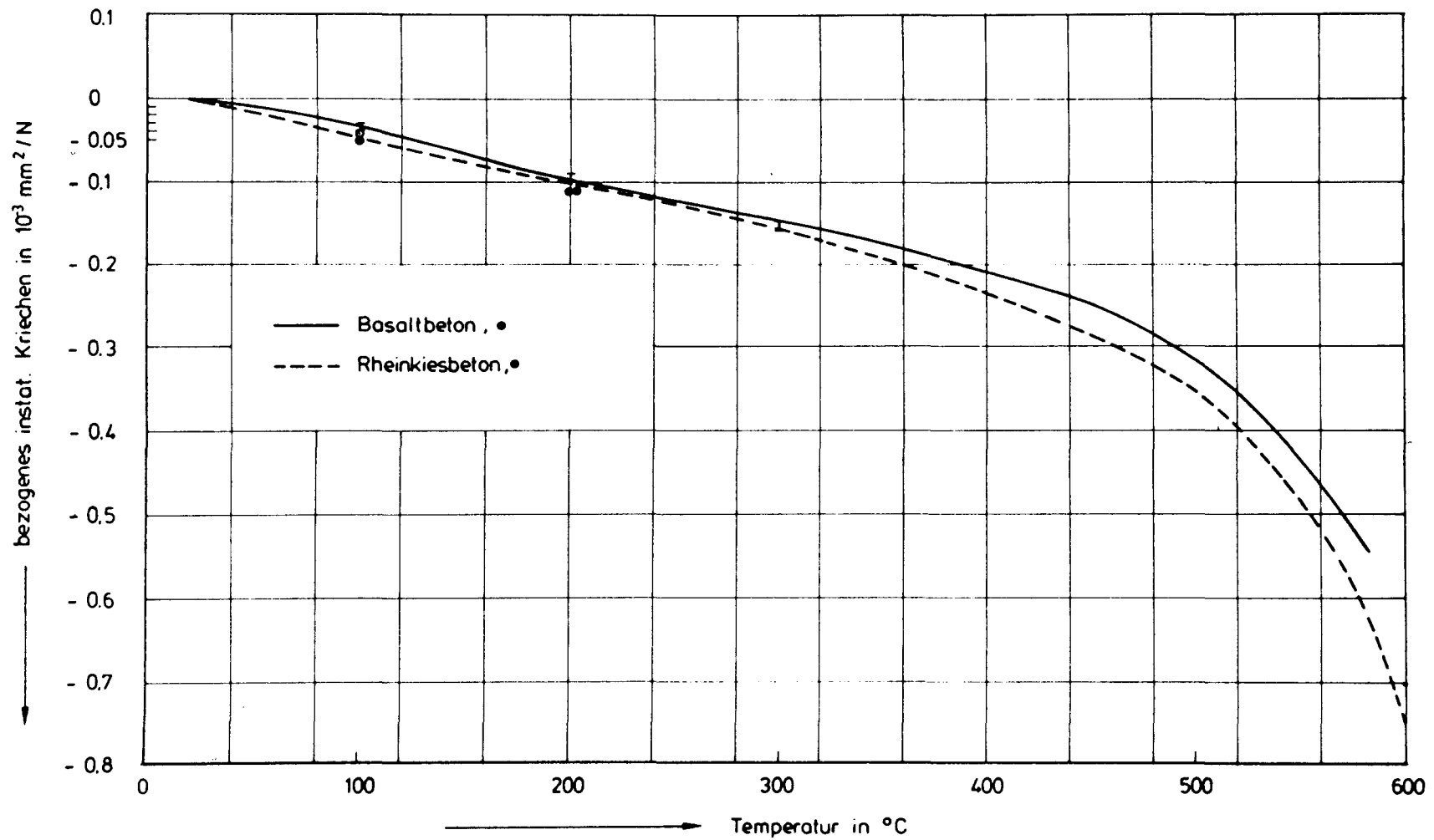


Bild 24: Bezogenes instationäres Kriechen von Basaltbeton und Rheinkiesbeton

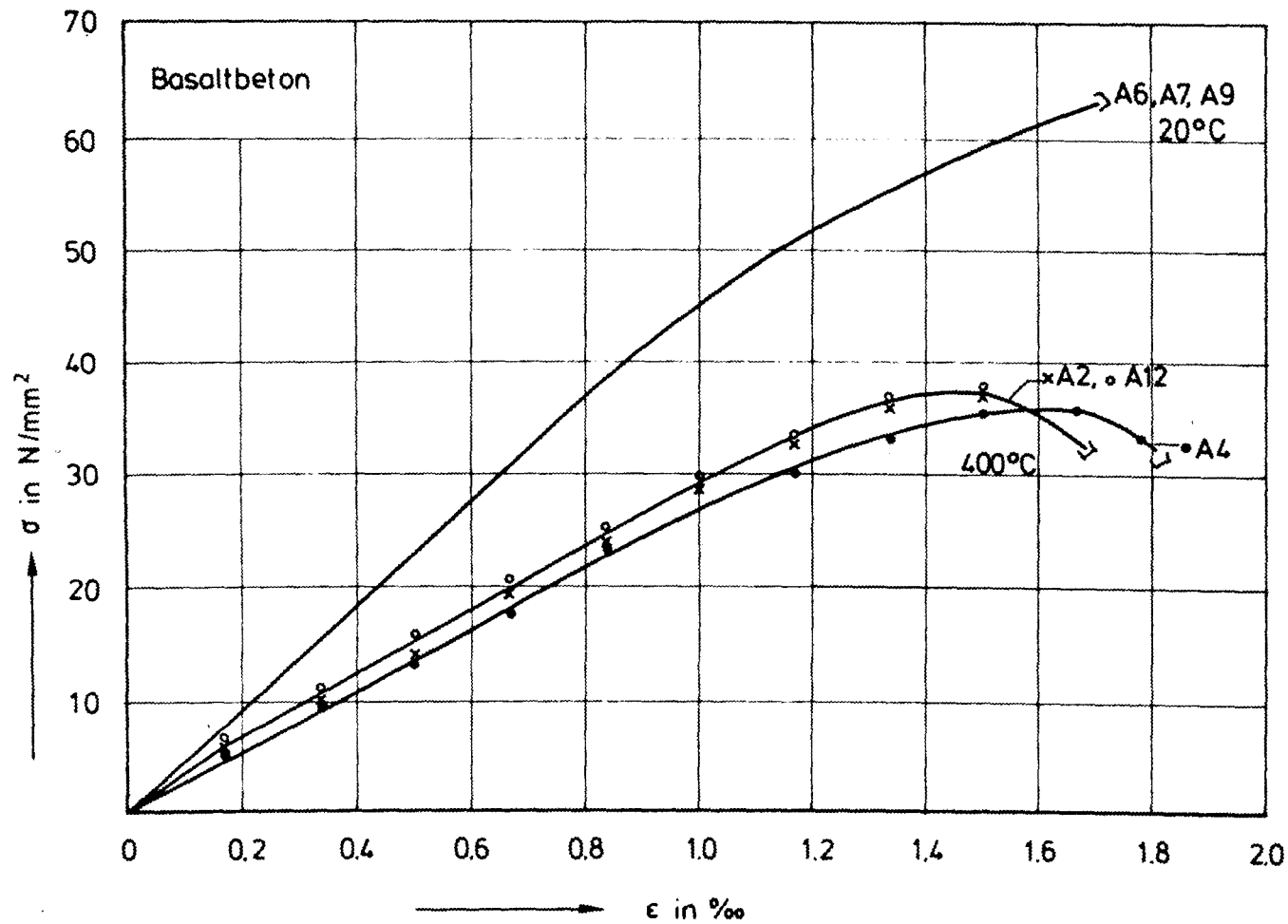


Bild 25: σ - ϵ -Diagramme von Basaltbeton bei Raumtemperatur und bei 400 °C (belastet aufgeheizte Proben)

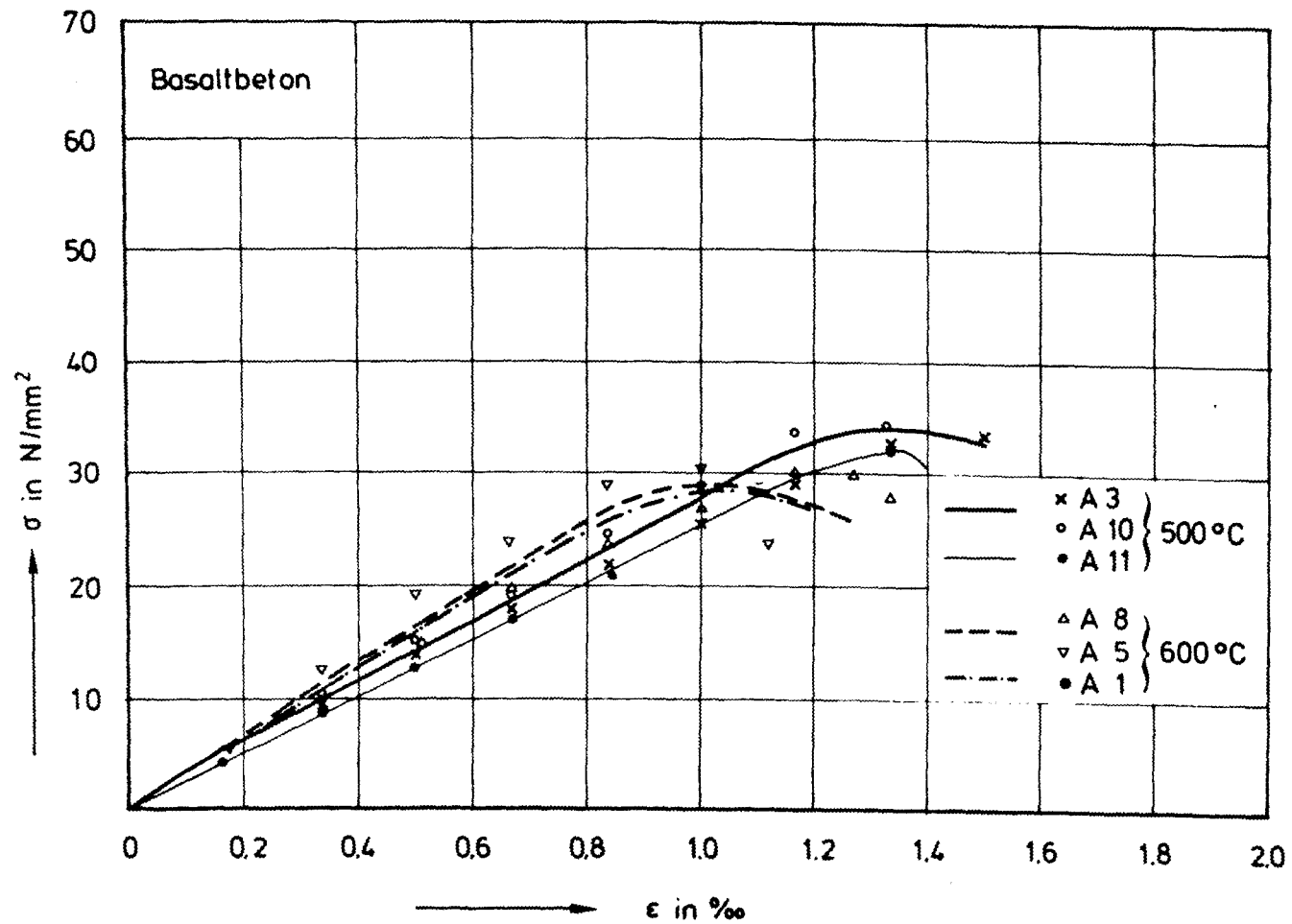


Bild 26: σ - ϵ -Diagramme von Basaltbeton bei 500 °C und 600 °C (belastet aufgeheizte Proben)

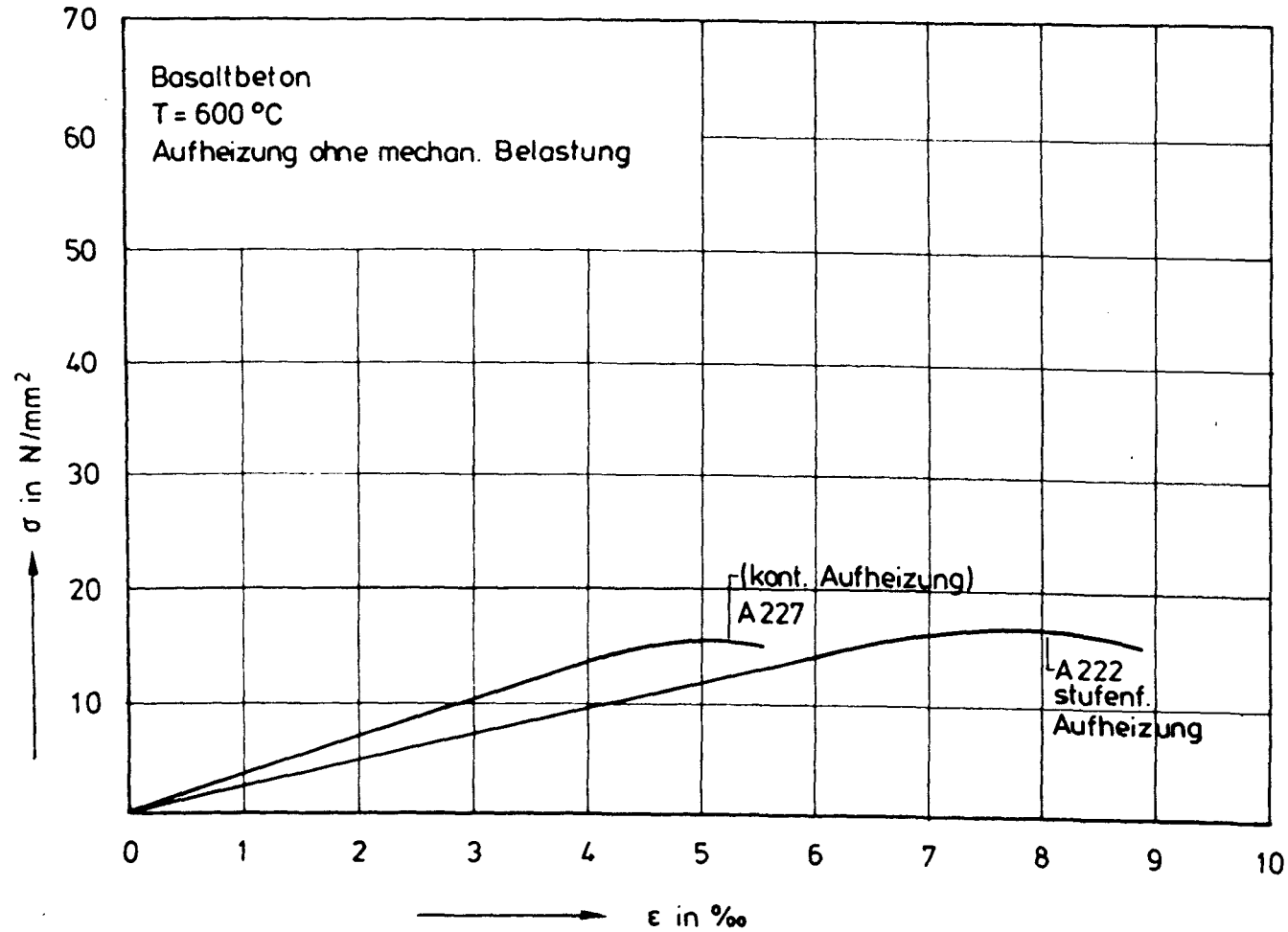


Bild 27: σ - ϵ -Diagramme von Basaltbeton bei 600 °C (unbelastet aufgeheizte Proben)

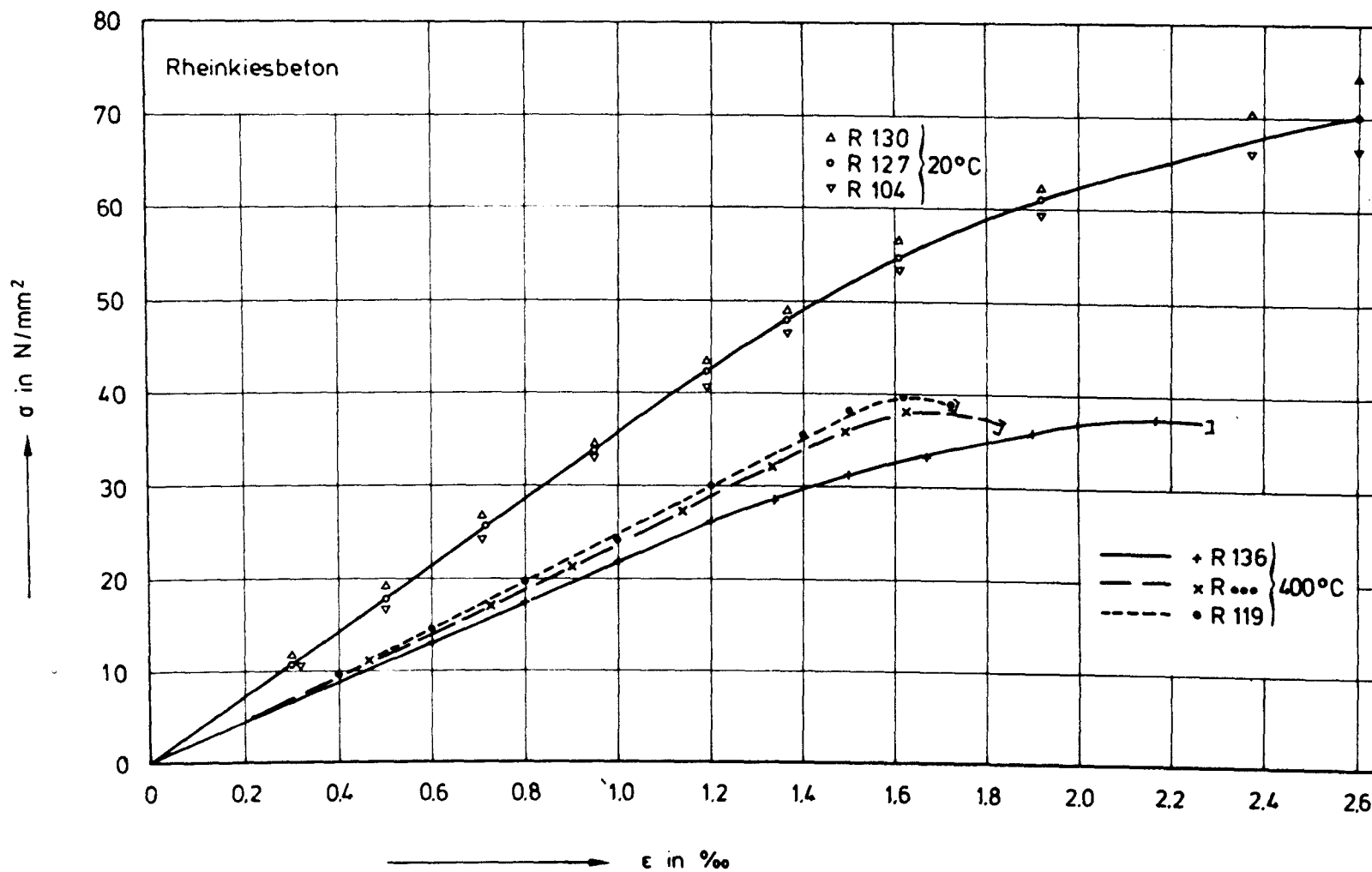


Bild 28: σ - ϵ -Diagramme von Rheinkiesbeton bei Raumtemperatur und bei 400 °C (belastet aufgeheizte Proben)

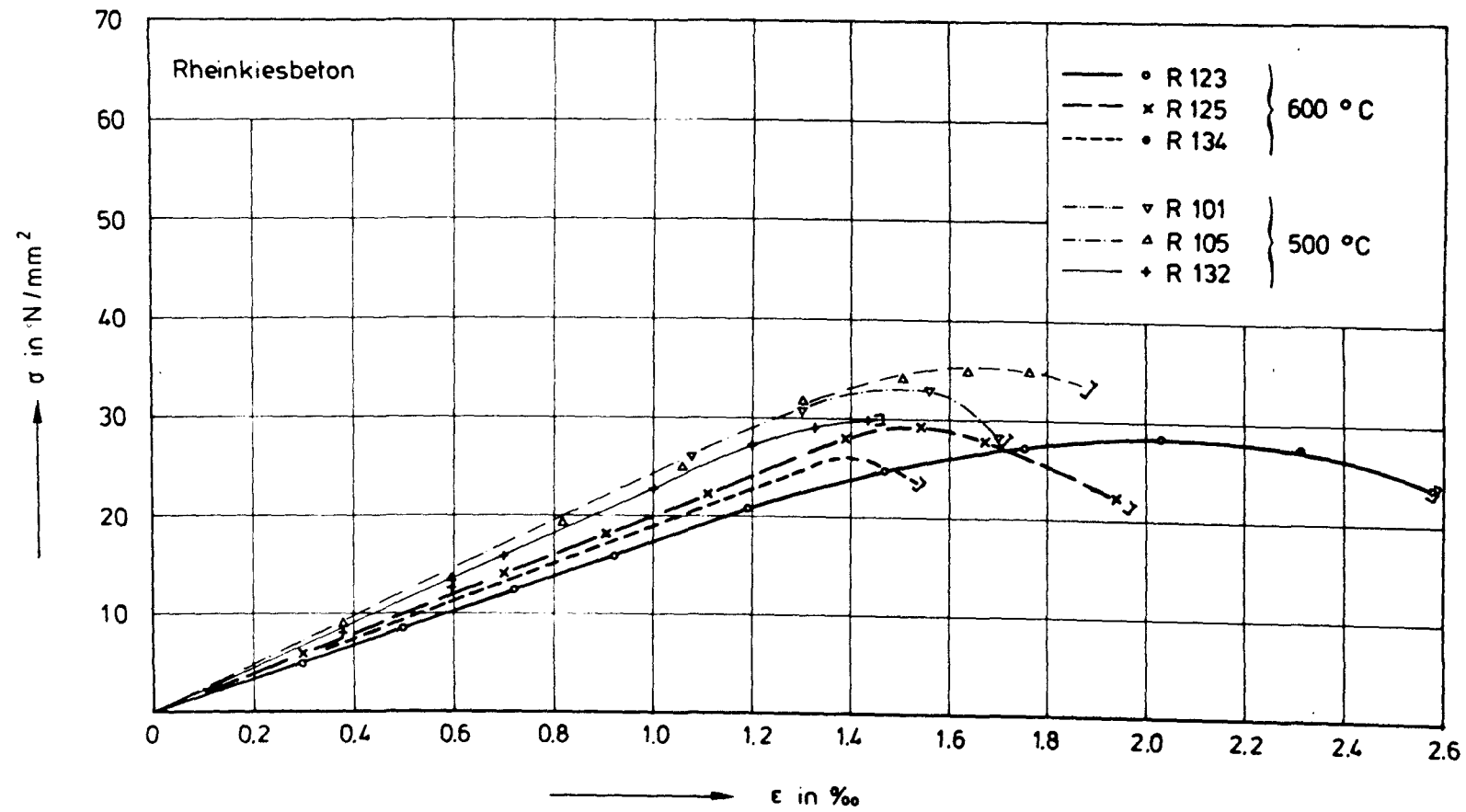


Bild 29: σ - ϵ -Diagramme von Rheinkiesbeton bei 500 °C und 600 °C (belastet aufgeheizte Proben)

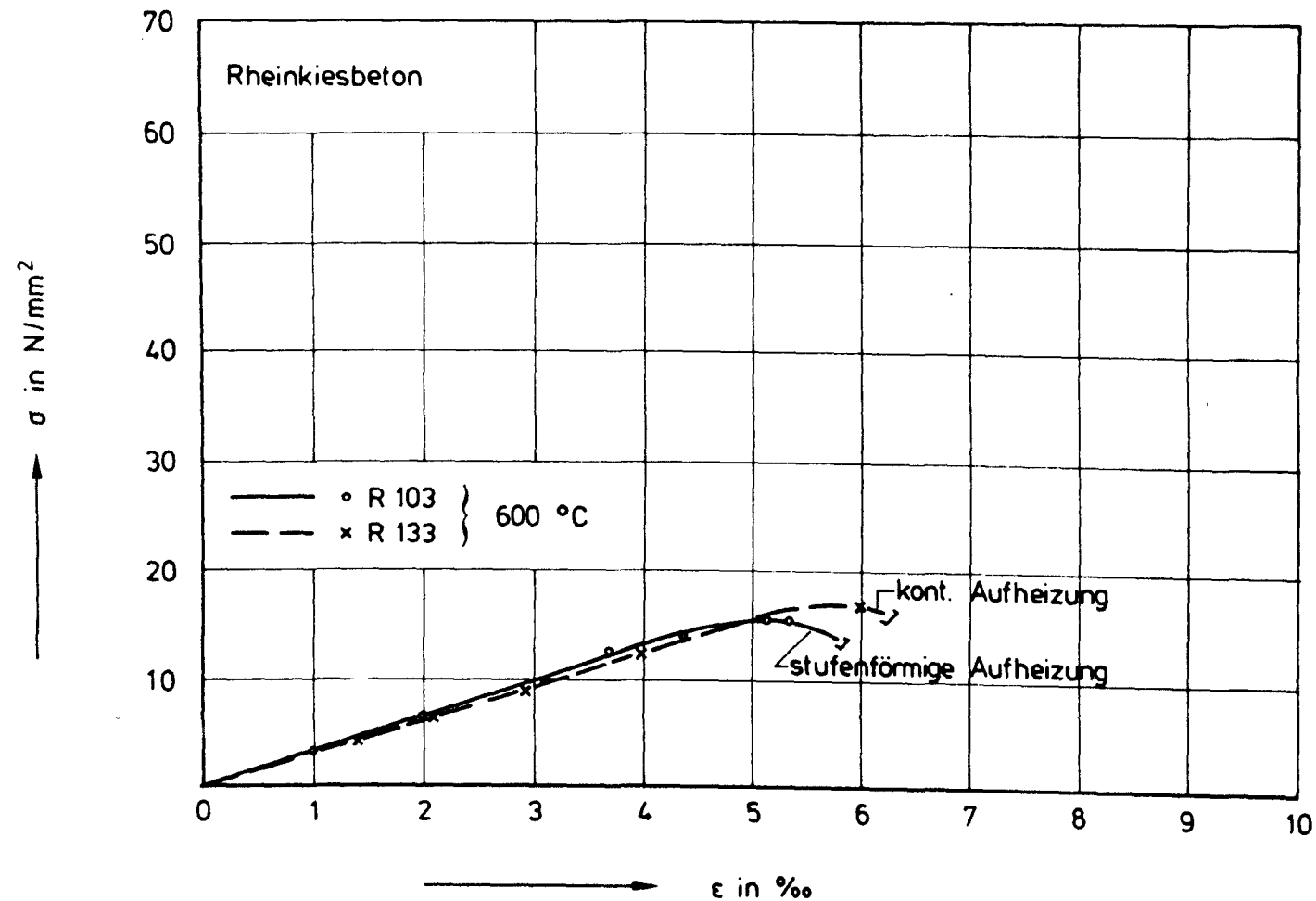


Bild 30: σ - ϵ -Diagramme von Rheinkiesbeton bei 500 °C (unbelastet aufgeheizte Proben)